

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR-MATRIZ

FACULTAD DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS Y CONTABLES

**TRABAJO DE TITULACIÓN DE MAGÍSTER EN ADMINISTRACIÓN DE
EMPRESAS CON MENCIÓN EN GERENCIA DE LA CALIDAD Y
PRODUCTIVIDAD**

**OPTIMIZACIÓN PRODUCTIVA DE UNA LÍNEA DE MERMELADAS DE
FRUTILLA UTILIZANDO EL DISEÑO EXPERIMENTAL COMO
HERRAMIENTA DE MEJORAMIENTO**

ING. JESSICA ESTEFANÍA NÁJERA FERNÁNDEZ

DIRECTOR: ING. SANTIAGO LÓPEZ CRESPO, MBA.

QUITO, 2016

DIRECTOR:

Ing. Santiago López Crespo, MBA.

INFORMANTES:

Ing. Darwin Ramírez Cárdenas, MBA.

Ing. Irina Verkovitch, Mgtr.

DEDICATORIA

Con gran humildad dedico todo mi trabajo y esfuerzo a Dios, todo es posible por Él.

Al hombre que me dio la vida, mi padre Marco Vinicio Nájera Yépez, que me enseñó con su ejemplo sobre la magia del esfuerzo y la sed por el conocimiento.

A mi compañero de vida, mi esposo Christian David Quelal Cisneros, que con su amor me ha fortalecido cuando he estado a punto de caer.

AGRADECIMIENTOS

Gracias Dios, por ser el gran manantial de vida e infinita bondad que alimenta mi día a día, y una vez más, me ha permitido cumplir otro reto.

Gracias papí, por todo el amor que me has dado, por enseñarme con paciencia todos los grandes valores que hoy me hacen ser quien soy, por todo tu esfuerzo y trabajo para darme lo mejor. Eres, y siempre serás, mi mejor profesor y mi ejemplo a seguir. Te amo, no tengo palabras para agradecer lo tanto me has dado.

Gracias mi amor, por ser la fuerza que me hace continuar, por darme tu apoyo incondicional, y nunca dudar de mí ni de mis capacidades. Eres mi motivación en cada despertar, mi mejor amigo, y sin duda, el mejor y único compañero de vida con el que Dios me ha bendecido, te amo y te respeto.

Gracias profe, por brindarme tanto conocimiento y ayudarme en este paso tan importante. Por confiar en mí, compartirme sus experiencias y ayudarme a abrir los ojos con herramientas tan prácticas que me ayudarán a ser una mejor profesional. Con seguridad puedo decir que es un gran profesor y el mejor tutor que pude tener.

INDICE

RESUMEN	XV
INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	3
1.1 Origen del nombre.....	3
1.2 Historia de la mermelada.....	3
1.3 Definición de mermelada	5
1.4 Materias primas de las mermeladas	6
1.4.1 Fruta	7
1.4.1.1 <i>Conservación por Congelación</i>	<i>7</i>
1.4.1.2 <i>Conservación por Esterilización</i>	<i>8</i>
1.4.1.3 <i>Conservación por Sulfatación</i>	<i>8</i>
1.4.2 Edulcorantes	8
1.4.2.1 <i>Sacarosa.....</i>	<i>9</i>
1.4.2.2 <i>Acesulfame de potasio</i>	<i>10</i>
1.4.2.3 <i>Aspartame</i>	<i>10</i>
1.4.2.4 <i>Glicósidos de esteviol</i>	<i>10</i>
1.4.2.5 <i>Sacarina, sacarina de sodio, sacarina de potasio y sacarina de calcio....</i>	<i>10</i>
1.4.2.6 <i>Sucralosa</i>	<i>11</i>
1.4.3 Acidificantes y tampones	11
1.4.4 Gelificantes.....	11
1.4.4.1 <i>Pectina</i>	<i>11</i>
1.4.4.2 <i>Tipos de pectina</i>	<i>12</i>

1.4.4.2.1	Pectinas de alta metoxilación	13
1.4.4.2.2	Pectinas de bajo metoxilación	14
1.4.4.2.3	Pectinas amidadas	15
1.4.5	Conservantes	16
1.4.5.1	Ácido sórbico	16
1.4.5.2	Ácido benzoico, Benzoato de potasio / sodio / calcio	16
1.4.6	Antiespumantes.....	17
2.	PROCESO PRODUCTIVO.....	18
2.1	Inspección, Recepción y Almacenamiento de Materia Prima	19
2.1.1	Inspección inicial	19
2.1.2	Inspección en laboratorio.....	20
2.2	Preparación de la fruta	21
2.3	Selección de la fruta	22
2.4	Lavado de la fruta.....	22
2.5	Pelado de la fruta	22
2.6	Despulpado de la fruta	23
2.7	Troceado de la fruta.....	23
2.8	Pesaje y dosificación de ingredientes	23
2.9	Mezcla de ingredientes	24
2.9.1	Adición de ácido cítrico	24
2.9.2	Adición de la pectina	24
2.10	Concentración o Cocción	25
2.11	Esterilización de envases de vidrios	27
2.12	Envasado	27
2.13	Etiquetado de Producto Terminado.....	27

2.14	Empacado, Paletizado y Almacenamiento	28
2.15	Liberación de Producto Terminado y Distribución	28
3.	MARCO TEÓRICO	30
3.1	Definición de proceso	30
3.2	Elementos de proceso	30
3.3	Diseño de Experimentos	31
3.4	Etapas del Diseño Experimental	32
3.4.1	Planeación del diseño experimental	32
3.4.1.1	<i>Estimación del tamaño de la muestra</i>	33
3.4.1.1.1	Teorema de Límite Central	33
3.4.1.1.2	Prueba de hipótesis estadística	34
3.4.1.1.3	Eficiencia	35
3.4.1.1.4	Tamaño de la muestra	35
3.4.1.2	<i>Tipos de muestreo</i>	36
3.4.1.2.1	Muestreo aleatorio simple	36
3.4.1.2.2	Muestreo sistemático	36
3.4.1.2.3	Muestreo estratificado	37
3.4.1.2.4	Muestreo de grupo	37
3.4.1.2.5	Muestreo no probabilístico	37
3.4.2	Realización del experimento	38
3.4.3	Análisis del experimento	38
3.4.4	Interpretación del diseño experimental	38
3.4.5	Control y conclusiones finales	38
3.5	Bloqueo y aleatorización	39
3.5.1	Estudiar o bloquear el experimento	39
3.5.2	Nulificar el efecto	39

3.5.3	Aleatorización	40
3.6	Clasificación y selección de diseños experimentales	40
3.6.1	Distribuciones de probabilidad	42
3.6.1.1	<i>Distribución Normal</i>	42
3.6.1.2	<i>Distribución t de Student</i>	44
3.6.1.3	<i>Distribución ji-cuadrado</i>	46
3.6.1.4	<i>Distribución F</i>	47
3.6.2	Análisis de Varianza (ANOVA)	49
3.6.2.1	<i>Método de diferencia mínima significativa (LSD)</i>	50
3.6.2.2	<i>Método de Tukey</i>	51
3.6.3	Diseños completamente al azar (DCA)	51
3.6.4	Diseño de bloques completos al azar (DBCA)	52
3.6.5	Diseño en cuadro latino (DCL)	53
3.6.6	Diseño de Cuadro Grecolatino (DCGL)	54
3.6.7	Diseño de Bloques Incompletos	55
3.6.8	Diseño Factorial	56
3.6.8.1	<i>Diseño factorial completo nk</i>	57
3.6.8.2	<i>Diseño factorial fraccionado nk-p</i>	58
3.6.8.3	<i>Diseño factorial incompleto</i>	62
3.6.9	Diseño Robusto de Taguchi o Arreglos Ortogonales	62
3.6.9.1	<i>Factores de control</i>	63
3.6.9.2	<i>Factor de señal</i>	64
3.6.9.3	<i>Factor de ruido</i>	64
3.6.9.4	<i>Tipos de estudios de robustez</i>	65
3.6.10	Diseño con arreglo interno y externo (diseño de parámetros)	70
3.6.10.1	<i>Razón señal/ruido</i>	70
3.6.10.2	<i>Etapas del diseño con arreglo interno y externo</i>	71

3.6.11	Metodología de Superficies de Respuesta (MSR)	71
3.6.11.1	<i>Región experimental y región de operación</i>	72
3.6.11.2	<i>Elementos de la Metodología de Superficies de Respuesta</i>	72
3.6.11.3	<i>Etapas de la Metodología de Superficies de Respuesta</i>	74
3.6.11.4	<i>Técnicas de optimización</i>	75
4.	SITUACION ACTUAL	76
4.1	Descripción de la Organización	76
4.1.1	Filosofía de la organización	76
4.1.1.1	<i>Misión</i>	76
4.1.1.2	<i>Visión</i>	76
4.1.1.3	<i>Valores</i>	76
4.1.2	Situación actual	77
4.1.2.1	<i>Descripción del problema</i>	78
4.2	Descripción del proceso de mermelada de frutilla en la organización	81
4.2.1	Inspección, Recepción y Almacenamiento de Materia Prima	81
4.2.2	Selección, Lavado y Troceado de la fruta	82
4.2.3	Pesaje y dosificación de ingredientes	83
4.2.4	Mezcla de ingredientes y Cocción	84
4.2.5	Esterilización de envases de vidrio	85
4.2.6	Envasado, etiquetado, empacado, paletizado y almacenamiento	85
4.2.7	Liberación de producto terminado y distribución	86
5.	APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	88
5.1	Planificación del diseño experimental	88
5.1.1	Definir el problema y objetivo	88
5.1.2	Realizar un esquema de estudio sobre el problema planteado	88

5.1.3	Determinar los factores y niveles de cada factor que van a investigarse	90
5.1.3.1	<i>Operador de concentrador</i>	93
5.1.3.2	<i>pH y porcentaje de sólidos solubles en la frutilla</i>	93
5.1.3.3	<i>Velocidad de agitador del concentrador</i>	94
5.1.3.4	<i>Tiempo de Cuarentena para liberar el lote de producción</i>	94
5.1.3.5	<i>Tiempo de cocción en concentrador y presión del concentrador</i>	94
5.1.3.6	<i>Temperatura de cámaras de almacenamiento refrigerado</i>	95
5.1.4	Elegir las variables de respuesta	97
5.1.5	Seleccionar el diseño experimental adecuado para los factores escogidos	97
5.1.5.1	<i>Diseño de Cuadro Greco-Latino</i>	98
5.1.5.2	<i>Diseño Factorial Completo</i>	100
5.1.5.3	<i>Diseño Factorial Fraccionado</i>	101
5.1.5.4	<i>Diseño Ortogonal</i>	104
5.1.6	Planificar el trabajo experimental	106
5.2	Realizar el experimento	107
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	108
6.1	Análisis Estadístico de los Factores	112
6.2	Valor de predicción o valor de pronóstico	114
7.	APLICACIÓN EN PLANTA DE PRODUCCIÓN	116
8.	CONCLUSIONES	119
9.	RECOMENDACIONES	120
10.	BIBLIOGRAFIA	121
11.	ANEXOS	126

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos de la mermelada de frutas según NTE 0419 (1988)	29
Tabla 2. Error de tipo I y Error de tipo II	34
Tabla 3. Arreglo de datos de un Diseño Completamente al Azar con 3 tratamientos.....	52
Tabla 4. Arreglo de datos de un Diseño de Bloques Completos al Azar con 3 bloques y 3 tratamientos	53
Tabla 5. Arreglo de datos de un Diseño en Cuadro Latino con 3 tratamientos para cada factor.....	54
Tabla 6. Arreglo de datos de un Diseño en Cuadro Grecolatino con 3 tratamientos cada factor.....	55
Tabla 7. Arreglo de datos de un Diseño Factorial 2^2 con 2 factores y 2 niveles para cada factor.....	57
Tabla 8. Diseños factoriales fraccionados de resolución IV, con máximo 64 corridas.....	61
Tabla 9. Diseño Factorial Completo 2^3	63
Tabla 10. Arreglo L_4 (fracción 2^{3-1}).....	66
Tabla 11. Arreglo L_9 (fracción 3^{4-2}).....	66
Tabla 12. Arreglo L_8 (fracción 2^{7-4}).....	67
Tabla 13. Arreglo L_{18} (fracción 3^{7-5})	68
Tabla 14. Arreglo L_{16} (fracción 2^{15-11}).....	69
Tabla 15. Cálculo de estadístico de prueba señal/ruido (S/R).....	70
Tabla 16. Factores de estudio para disminuir la variabilidad de consistencia en mermelada de frutilla	90
Tabla 17. Análisis estadístico para los 475 lotes de frutilla aceptados en el año 2014	93

Tabla 18. Niveles para los factores de pH y porcentaje de sólidos solubles	93
Tabla 19. Factores de estudio y niveles de cada factor.....	96
Tabla 20. Resumen de necesidad de recursos por cada corrida experimental.....	98
Tabla 21. Diseño de cuadro Greco-Latino para disminución de variabilidad en consistencia de mermelada de frutilla	99
Tabla 22. Recursos para utilizar Diseño de Cuadro Greco-Latino	99
Tabla 23. Diseño Factorial Completo para disminución de variabilidad en consistencia de mermelada de frutilla.....	101
Tabla 24. Recursos para utilizar Diseño Factorial Completo	101
Tabla 25. Diseño Factorial Fraccionado para disminución de variabilidad en consistencia de mermelada de frutilla	103
Tabla 26. Recursos para utilizar Diseño Factorial Completo	103
Tabla 27. Diseño de Arreglo Ortogonal L18 (2×3^7) para disminución de variabilidad en consistencia de mermelada de frutilla	104
Tabla 28. Recursos para utilizar Diseño Factorial Completo	105
Tabla 29. Resumen y comparación de diseños experimentales considerados.....	105
Tabla 30. Aleatorización del Diseño Experimental con Arreglo Ortogonal	106
Tabla 31. Análisis de Varianza de Relaciones SN	113
Tabla 32. Tabla de respuesta para relaciones de señal ruido – Más grande es mejor	113
Tabla 33. Mejor nivel para cada Factor	114
Tabla 34. Niveles de cada factor para la aplicación en planta productiva.....	115
Tabla 35. Comparativo de valores de consistencia antes y después de realizar el estudio estadístico con Diseño de Taguchi	116

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pectina de alta metoxilación con un grado de esterificación del 60%	14
Figura 2. Pectina de baja metoxilación con un grado de esterificación del 20%	15
Figura 3. Pectinas amidadas con un grado de esterificación de pectina del 40% y 20% de amidación	15
Figura 4. Flujograma del proceso de elaboración de mermeladas	18
Figura 5. Clasificación de los diseños experimentales	41
Figura 6. Distribución de probabilidad para la Curva Normal (x) convertida en Distribución Normal Estándar (z).....	43
Figura 7. Área bajo la curva para la Distribución Normal Estándar	44
Figura 8. Distribución Normal Estandarizada en comparación a la curva t de Student, y sus regiones de rechazo con un nivel de significancia de 0.05 y prueba de una cola.....	45
Figura 9. Distribución de probabilidad para la curva Ji-cuadrado	47
Figura 10. Distribución de probabilidad para la curva F	48
Figura 11. Representación de diseños factoriales fraccionados 2^{3-1}	58
Figura 12. Ejemplo 1 en construcción de un diseño factorial fraccionado $2IV4 - 1$	60
Figura 13. Ejemplo 2 en construcción de un diseño factorial fraccionado $2IV4 - 1$	60
Figura 14. Representación gráfica de región de operación y región experimental	72
Figura 15. Modelos de primer y segundo orden en la metodología de superficie de respuesta.	73
Figura 16. Visión gráfica de la metodología de superficie de respuesta.	74
Figura 17. Ventas anuales del 2014 por tipo de producto	78

Figura 18. Reclamos por defecto.....	78
Figura 19. Reclamos por consistencia	79
Figura 20. Consistencia de mermelada de frutilla en el año 2014.....	80
Figura 21. Recepción, Inspección y Almacenamiento de la frutilla.....	82
Figura 22. Operador en proceso de troceado de fruta	83
Figura 23. Pesaje de ingredientes para mermelada de frutilla.....	83
Figura 24. Proceso de mezcla de ingredientes y cocción de semielaborado	84
Figura 25. Esterilización de los envases de vidrio	85
Figura 26. Envasado, etiquetado y almacenamiento de producto	86
Figura 27. Análisis Físico-Químicos y Sensoriales para Liberación de producto.	87
Figura 28. Diagrama de Causa – Efecto para disminución de la variabilidad de consistencia en Mermelada de Frutilla	89
Figura 29. Efectos principales para medias de los factores de estudio	109
Figura 30. Histograma de consistencia de la mermelada antes y después de la experimentación.....	118

RESUMEN

En la actualidad, las industrias necesitan evolucionar y desarrollar continuamente sus procesos para superar los constantes retos a los que se enfrentan diariamente, para lo cual buscan mejorar sus actividades tanto administrativas y operativas. Para lograr el mejoramiento deseado en los procesos, existen varias estrategias de experimentación que se puede utilizar, entre los cuales existen: mejor acierto, un factor a la vez y metodologías estadísticas. A pesar de que se conoce que las herramientas de diseños experimentales permiten una optimización de tiempo y recursos frente a las otras estrategias, en la mayoría de empresas se realizan pruebas basadas en un sistema de ensayo y error bajo experiencias adquiridas y conocimiento empírico.

Los experimentos son acciones esquematizadas que descubren, demuestran o comprueban determinadas particularidades de un proceso o sistema. Los experimentos son muy utilizados en el campo de la investigación y la ciencia, sin embargo, cualquier persona que se encuentre capacitada en diseño estadístico de experimentos podría utilizarlo, ya que es un proceso sencillo. Al realizar un diseño experimental, es fundamental decidir el modelo a utilizar, los factores, niveles y repeticiones que se necesitan para obtener la mayor información posible al menor costo.

El presente trabajo aplica herramientas del diseño experimental para lograr la optimización y mejoramiento de una línea productiva de elaboración de mermelada de frutilla en una empresa familiar manufacturera de alimentos en Quito, que cumpla con la normativa técnica vigente del Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, con la ficha técnica interna de la empresa para producto terminado, y que además brinde las mismas características organolépticas que la mermelada actual para no afectar al consumidor.

El estudio se realiza debido a que la empresa familiar presenta quejas por parte de los clientes debido a poca o exceso de consistencia en la mermelada de frutilla. Por esta razón se decide realizar un diseño experimental con el objetivo de optimizar y mejorar la línea productiva y obtener la estandarización del producto terminado. Después de analizar

algunas propuestas, se escoge el Diseño de Taguchi como herramienta de optimización de la línea productiva de mermeladas de frutilla, y se escoge ocho factores de estudio, los cuales son: operador de concentrador, pH de la frutilla, porcentaje de sólidos solubles de la frutilla, velocidad de agitación del concentrador, tiempo de cuarentena, tiempo de cocción en concentrador, presión del concentrador y temperatura de cámaras de almacenamiento en refrigeración.

Finalmente, se obtiene que el factor de operador del concentrador no presenta influencia sobre la consistencia de la mermelada de frutilla, mientras que los otros factores sí aportan con una influencia ya sea en mayor o menor grado. Los factores que aportan con mayor influencia sobre la consistencia de la mermelada de frutilla son el porcentaje de sólidos solubles y el pH de la fruta. Se logra optimizar la línea productiva mediante la designación y control de los mejores niveles escogidos para cada uno de los factores. Los resultados del diseño experimental son aplicados por un período de prueba en planta industrial obteniendo una mejoría significativa en los resultados de la estandarización de la consistencia de la mermelada de frutilla.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la búsqueda de mejoras administrativas y operativas a nivel industrial para desarrollar y evolucionar sus procesos y productos es un reto constante al que se enfrentan todas las empresas. La mejora de procesos es objetiva y se emplea hasta obtener el nivel requerido. En este ámbito, el diseño experimental aporta al mejoramiento de procesos, ya que es una herramienta que consiste en realizar una serie de experimentos con base al análisis estadístico de calificaciones cualitativas y cuantitativas concretas, mediante la modificación controlada de variables conocidas del proceso, identificando las causas de los cambios por las respuestas de salida, y así lograr el fin identificado inicialmente. El diseño de experimentos puede ser usado desde un experimento simple para analizar causas y efectos, hasta un conjunto sistemático de técnicas estadísticas experimentales para mejorar procesos y productos más complejos. La experimentación suele emplearse en las áreas de diseño de productos y en la mejora de procesos, dando descripciones aproximadas de cómo se comportan los procesos de acuerdo al tema de interés.

En la industria a pesar de los problemas de tiempo y recursos, constantemente se realizan experimentos para resolver problemas o comprobar una idea. Sin embargo, a pesar de que se conoce que el diseño de experimentos es una herramienta eficaz, la gran mayoría de veces las pruebas se realizan bajo un sistema de ensayo y error basado en experiencias adquiridas y conocimiento empírico.

Las empresas pueden ser categorizadas de acuerdo a la estrategia de experimentación que utilizan, es así como pueden ser: mejor acierto (Best Guess), un factor a la vez (OFAT) o siguiendo metodologías estadísticas (DoE). La estrategia llamada de “mejor acierto” utiliza al conocimiento y las experiencias previas para elaborar las pruebas bajo las condiciones que se intuye ofrecen los mejores resultados. La estrategia de “un factor a la vez” consiste en variar un factor a la vez y medir los efectos que tiene sobre la respuesta de salida, y así estudiar las variables por separado. Finalmente, la “metodología estadística” permite hallar las mejores condiciones para el proceso o producto mediante el estudio de las posibles relaciones entre varios factores al mismo tiempo (Tanco, Ilzarbe, Viles & Álvarez, 2008).

El diseño de experimentos se obtiene mediante la aplicación de métodos científicos y estadísticos que generan conocimiento acerca de un proceso o sistema, por medio de pruebas planificadas adecuadamente (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Esta metodología se ha consolidado en varias técnicas estadísticas que permiten entender las relaciones de causa-efecto que se desea observar y estudiar.

El presente trabajo está diseñado para aplicar el diseño experimental como herramienta de optimización y mejoramiento mediante la reducción en la variación de la consistencia en la línea productiva de elaboración de mermelada de frutilla de una planta manufacturera de alimentos de Quito, que cumpla con la normativa vigente actual del Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, con la ficha técnica interna de la empresa para producto terminado, y que además brinde las mismas características organolépticas que la mermelada actual para no afectar al consumidor. Para obtener ese resultado, se analiza varios modelos de experimentación y se escoge el que permita estudiar los factores que pueden producir una variación en la consistencia de la mermelada de frutilla y los niveles en los que se debe trabajar a través de todo el procedimiento de elaboración.

La hipótesis que se va a comprobar en el presente trabajo refiere a la aplicación de herramientas de diseño experimental en una línea productiva de mermeladas de frutilla que logra reducir la variabilidad en consistencia del producto terminado en una empresa productiva de alimentos del norte de Quito.

1. DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

1.1 Origen del nombre

La palabra mermelada proviene del portugués *marmelada* y significa conserva de membrillo u otras frutas, con miel o azúcar (Real Academia Española, 2001). A su vez, la palabra *marmelada* tiene su origen del latín *melimelum* que es un tipo de manzana muy dulce. La palabra *meli* significa miel y *mêlon* significa manzana (Oxford Dictionaries, 2015).

1.2 Historia de la mermelada

Al igual que numerosos alimentos, los historiadores gastronómicos tienen varias teorías acerca del origen de la mermelada. Sin embargo, es indudable que están ligadas al descubrimiento, desarrollo y manejo de los diferentes edulcorantes como la miel, el azúcar de caña y azúcar de remolacha ya que es parte de la materia prima utilizada. Además, estos productos nacen por la necesidad de conservar a las frutas desde el periodo de cosecha y abundancia hasta el período de escasez.

En el libro de cocina romana *De re coquinaria* (en español: De asuntos culinarios) escrito por Marcus Vavius Apicius en el siglo I D.C., se incluye recetas con frutas preservadas. Los romanos conservaban a las frutas sumergiéndolas en miel, debido a que el azúcar aún no era descubierta. Fueron los árabes quienes implementaron los cultivos de caña de azúcar en el Mediterráneo, por lo que es muy posible que las primeras jaleas y mermeladas con azúcar hayan sido elaboradas en el Medio Oriente. Se dice que los cruzados llevaron jaleas y mermeladas de frutas a Europa después de sus invasiones. (Perez, et. al., 2011)

Se relata que la mermelada fue creada alrededor del año 1561 por un médico para aliviar a María, reina de Escocia, cuando se sentía enferma y con mareos. La receta original contenía naranja y azúcar molida. El médico al ser francés decía *Marie est malade* (en español: María está enferma), y esta frase fue deformándose en *marmalade* (en español:

mermelada). Sin embargo, no existen pruebas documentales ni referencias que apoyen esta hipótesis. (Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2009).

Por otro lado, se cuenta con documentación escrita entre el año 1228 al 1243, por el gastrónomo Ibn Razin al-Tuyibi en su libro *Fudúlat aljiwán fi tayyibút al-ta'ctm wa-l-alwán* (en español: Relieves de las Mesas, acerca de las delicias de la comida y los diferentes platos) en donde describe a las mermeladas como obleas que se desmigán en miel o sirope para elaborar dulces. (Lamberti, 2013). En el año 1480, la palabra mermelada aparece por primera vez en inglés, pero se populariza recién en el siglo XVII. En este tiempo se elaboran las famosas mermeladas de naranja de Sevilla. Posteriormente se extiende el uso de la palabra a todos los países europeos para designar las confituras de fruta. (Navarrete & Uriarte, 2011)

Uno de los primeros métodos de conservación por calor a nivel industrial fue exactamente la fruta en lata. Esto se originó como respuesta a la sobre producción en Gran Bretaña, donde se crearon varias fábricas para producir conservas de frutas con azúcar, es decir, fruta enconfitada, jaleas y mermeladas. Es así como mayor cantidad de población podían acceder a frutas, que incluso no eran de temporada. (Perez, et. al., 2011)

Por varios años, los métodos de preservación de las frutas fue una preocupación en los hogares. Las amas de casa tenían acceso a las frutas únicamente locales y sólo en tiempo de cosecha. Es así como surge la necesidad de tener mayor variedad de frutas a lo largo de todo el año. A pequeña escala, las amas de casa empezaron a mezclar como base una taza de fruta con una taza de azúcar con tratamiento de calor lento. Al colocar la mezcla en frascos y almacenarlos, descubrieron que los productos se mantenían por largo tiempo. Esta técnica se fue popularizando ya que permitía a las familias un mayor acceso a las frutas, manteniendo su buen estado y buen sabor. (Downing, 1996)

La industria actual ha mejorado la técnica de preservación de frutas utilizada por varios años en los hogares, con el objetivo de mejorar las características organolépticas del producto. Hoy en día se utiliza vacío para la evaporación, de esta forma se conserva mejor el sabor y el color, ya que la evaporación se realiza a menor temperatura. Además, se utiliza pectina extraída de las manzanas y los cítricos, la cual ha pasado por un proceso de

uniformidad y control para estandarizar el producto final. La adición de ácido y vinagre que aporta acidez al producto es muy utilizado de igual forma.

Las jaleas y mermeladas son productos muy populares para el público menor y adulto. Además, son ingredientes muy comunes para endulzar y aromatizar muchos alimentos, desde pasteles hasta carnes cocidas. Hoy en día, existen mermeladas de todos los tipos de frutas, como frutilla, manzana, piña, mora, durazno, etc.

Existe mucha información sobre el origen de las mermeladas, y las conservas de fruta. Desde la antigua Roma hasta la actual época moderna, las frutas enconfitadas han tenido una gran aceptación por el consumidor, lo que justifica la gran variedad en sabores, aromas y tamaños en la actualidad.

1.3 Definición de mermelada

Según la Norma Técnica Ecuatoriana 0419 (1988) referente a los requisitos para las conservas vegetales y mermeladas de frutas, la definición de mermelada “es el producto obtenido por la cocción del ingrediente de fruta (...) mezclado con azúcares, otros ingredientes permitidos y concentrado hasta obtener la consistencia adecuada”.

En esta enunciado son tres los aspectos importantes con los que hay que trabajar y puntualizar más a profundidad. Se debe definir qué son los ingredientes de fruta, cuáles son los otros ingredientes permitidos, y finalmente a qué se considera una consistencia adecuada.

Por este motivo, la NTE 0419 también define a qué se le debe considerar como ingrediente de fruta. Así explica qué se refiere a producto preparado a partir de

- a. “Fruta fresca, fruta entera, trozos de fruta, pulpa o puré de fruta, congelada, concentrada y/o diluida o conservada por algún otro método permitido
- b. Fruta sana, comestible, de madurez adecuada y limpia, no privada de ninguno de sus componentes principales, con excepción de que esté cortada, clasificada o tratada por algún otro método para eliminar defectos tales como

magullamientos, pedúnculos, partes superiores, restos, corazones, hueso (pepitas) y que puede estar pelada o sin pelar.

- c. Que contiene todos los sólidos solubles naturales (extractivos) excepto los que se pierden durante la preparación de acuerdo con las prácticas correctas de fabricación.”

En cuanto a los otros ingredientes permitidos, la NTE 0419 establece la adición de sustancias tales como pectina, ácido cítrico, antioxidantes, edulcorantes, antiespumantes y preservantes tales como benzoato sódico, ácido sórbico y sorbato potásico. Algunas de estas materias primas tienen un control de cantidad máxima a colocar dentro de la conserva de fruta.

Con consistencia adecuada, la NTE 0419 se refiere a una textura firme, untosa, sin llegar a ser dura. Además, explica que en caso de usar trozos de fruta, éstos deben estar uniformemente dispersos en todo el producto.

Como complemento, la NTE 0419 anuncia como característica que la mermelada debe ser elaborada con 45 partes del ingrediente de fruta original por cada 55 partes del edulcorante, en masa. Entre los edulcorantes mencionados se encuentran azúcar refinado, azúcar invertido, dextrosa o jarabe de glucosa. No se permite el uso de edulcorantes artificiales.

Se debe tomar en cuenta que la proporción de fruta y edulcorante puede variar en función del tipo de mermelada, el estado de maduración de la fruta, la cantidad de pectina natural de la fruta, entre otros factores.

1.4 Materias primas de las mermeladas

Los componentes necesarios para elaborar mermeladas principalmente son la fruta y el agente edulcorante. Adicional a estos, se agrega otros ingredientes permitidos como agentes gelificantes, ácidos, sales tampón, colorantes y preservantes. Finalmente, algunos fabricantes adicionan bebidas espirituosas, condimentos o especias al producto para darle

su toque diferencial. A continuación se explicará a cada uno de los ingredientes mayormente utilizados en la elaboración de mermeladas.

1.4.1 Fruta

La fruta tiene una gran repercusión en las características de la mermelada, por lo que la estandarización correcta de esta materia prima es un factor clave para el buen desempeño del producto terminado. Primeramente, hay que verificar el grado de maduración de la fruta. Una fruta muy inmadura puede tener un bajo rendimiento debido a que la pectina presente no es soluble ni disponible. Además puede influenciar negativamente en las características organolépticas del producto, dándole un color muy pálido y poca intensidad de aromas. Por otro lado, la fruta excesivamente madura tiene mayor posibilidad de deterioro microbiológico, y posee menor cantidad de pectina en su estructura por degradación enzimática. (Broomfield, 1997).

Debido a la temporalidad propia de muchas frutas, son pocas las empresas que pueden fabricar mermeladas partiendo de fruta fresca a lo largo de todo el año. Por este motivo, en la actualidad las compañías utilizan fruta que ha pasado previamente por algún método de conservación, los cuales pueden ser congelación, enlatado o sulfatación.

1.4.1.1 Conservación por Congelación

El proceso de congelación se refiere a la conservación de productos con el uso de temperaturas menores a 0°C, y frecuentemente, cercanas a -18°C. A pesar de que las características nutricionales y organolépticas de la fruta como color y aroma se conservan casi inalterables, la textura es la gran afectada por la formación de cristales de hielo que rompen su estructura celular inicial. Para evitar este deterioro, se recomienda realizar una congelación rápida mediante fuertes corrientes de aire frío, contacto de superficies frías o en sumersión en líquidos con temperaturas menores a 0°C. Con la congelación rápida también se restringe la difusión de sales, la separación de agua en forma de hielo, la oxidación de la fruta, la actividad enzimática, procesos fermentativos y se limita el desarrollo de bacterias, levaduras y mohos, evitando la descomposición en el almacenamiento (Acerete, 1950)

1.4.1.2 Conservación por Esterilización

La esterilización comercial es un proceso de conservación que utiliza altas temperaturas, generalmente mayores a 100°C, para garantizar la reducción microbiológica de agentes patógenos y responsables del deterioro del alimento. Para lograrlo, el producto debe ser envasado en latas o bidones que cuentan una superficie interna lacada, se agrega una solución caliente de almíbar adecuada para cada fruta la cual ayuda en la eliminación de aire y burbujas del interior, se sella y se somete a tratamiento térmico. Inmediatamente después, los envases deben ser enfriado rápidamente por inmersión en agua a bajas temperaturas, esto permite garantizar un shock térmico. Este es el motivo de que el producto obtenido sea totalmente aséptico. Esta materia prima tratada puede guardarse por dos años. (García & Oliveros, 2010)

1.4.1.3 Conservación por Sulfatación

La sulfatación es un método de conservación química simple, poco costosa, en el que se utiliza dióxido de azufre. La concentración más utilizada es de 2g a 3g de dióxido de azufre en disolución acuosa al 6% del gas por cada 1 kg de fruta. Este compuesto se añade directamente a la fruta, la cual es almacenada en bidones con cubierta de polietileno. Este método no es muy utilizado debido al proceso de eliminación del dióxido de azufre al que se somete a la fruta posteriormente. Además, este gas es uno de los responsables de la lluvia ácida, por lo que tiene una implicación medio ambiental. (Broomfield, 1997)

Antes de utilizar la fruta en la manufactura de la mermelada, esta debe pasar por otros procesos como selección, lavado, cortado o despulpado, dependiendo del tipo de fruta que se utilice como materia prima.

1.4.2 Edulcorantes

Los edulcorantes se refieren a toda sustancia que le aporte dulzor al producto, pueden ser naturales o artificiales. Hay sustancias que aportan mayor dulzor que otras, a esta característica se la llama poder edulcorante. El poder edulcorante es la capacidad del compuesto para producir la sensación de dulzor comparado con la sacarosa, o también llamada azúcar blanca. Los edulcorantes naturales son carbohidratos, por lo que aportan

calorías al producto. Por otro lado, los edulcorantes artificiales no son metabolizados, y por consiguiente no aportan calorías a la dieta (Badui, 2006). Dentro de los edulcorantes mayormente utilizados están:

1.4.2.1 Sacarosa

La sacarosa es el edulcorante utilizado con mayor frecuencia. Se usa en diferentes presentaciones como en polvo con diferentes grados de granulometría, en disolución acuosa o en jarabe. Para que el producto sea estable a temperatura ambiente, el contenido final de sacarosa en el producto debe ser como mínimo de 60% (Coronado & Hilario, 2001). Este componente es esencial para la gelatinización del producto, en especial con pectinas de alto metoxilo. Además, reduce la actividad de agua en <0.8 , evitando contaminación microbiológica. (Badui, 2006)

La sacarosa está compuesto por una molécula de glucosa y otra de fructosa. Cuando la sacarosa es sometida a tratamiento térmico, como en el proceso de elaboración de mermeladas, estas moléculas sufren un cambio en su rotación y existe una reacción química de hidrólisis. Como resultado, se obtiene las moléculas separadas de glucosa y fructosa conocido como azúcar invertido, el cual aporta un mayor poder edulcorante al producto. Aproximadamente, el 25% de la sacarosa se convierte en azúcar invertido durante el proceso de elaboración de mermeladas. Se debe tener en cuenta el contenido de azúcar invertido en el producto elaborado, ya que este puede afectar la gelificación y su potencial cristalización, especialmente en productos con un contenido de sólidos solubles totales más altos. (Espinoza, 2008)

La concentración de la sacarosa en la formulación debe ser equilibrada, de tal forma que prolongue su vida útil organolépticamente y microbiológicamente. En caso de que la concentración del azúcar sea muy baja, puede darse una fermentación del producto. Por otro lado, si la concentración es muy alta, el producto puede cristalizar. Este último efecto también puede generarse por carencia de ácido en la mermelada.

1.4.2.2 Acesulfame de potasio

Tiene un poder edulcorante entre 150 a 200 veces más que la sacarosa. Es estable a temperaturas elevadas, muy hidrosoluble y mantiene sus propiedades organolépticas en un rango muy amplio de pH. No deja regustos desagradables en concentraciones adecuadas (Badui, 2006). En la Norma General para los Aditivos Alimentarios (1995) definida por el Codex Alimentarius se describe que la dosis máxima de Acesulfame para Confituras, jaleas y mermeladas debe ser de 1g de aditivo por 1 kg de alimento.

1.4.2.3 Aspartame

El poder edulcorante del aspartame es de 150 a 200 veces más dulce que la sacarosa y no tiene regusto amargo. Sin embargo, es estable únicamente en pH de 3 a 5, perdiendo su poder fuera de este intervalo. Es sensible a altas temperaturas ya que su estructura molecular se destruye por hidrólisis (Badui, 2006). En la Norma General para los Aditivos Alimentarios (1995) definida por el Codex Alimentarius se describe que la dosis máxima de Aspartame para Confituras, jaleas y mermeladas debe ser de 1g de aditivo por 1 kg de alimento.

1.4.2.4 Glicósidos de esteviol

Tiene 300 veces el poder edulcorante de la sacarosa, pero presenta un ligero sabor amargo. Es más estable en soluciones con un pH <4 y resiste muy bien los tratamientos térmicos (Badui, 2006). En la Norma General para los Aditivos Alimentarios (1995) definida por el Codex Alimentarius se describe que la dosis máxima de los glicósidos de esteviol para Confituras, jaleas y mermeladas debe ser de 360mg de aditivo por 1 kg de alimento.

1.4.2.5 Sacarina, sacarina de sodio, sacarina de potasio y sacarina de calcio.

Tienen un poder edulcorante de 300 a 400 veces el de la sacarosa, pero aportan un regusto amargo metálico, que se acentúa en altas concentraciones. Los compuestos son estables a pH de 2 a 9, y soportan moderadamente los tratamientos térmicos. (Badui, 2006). En la Norma General para los Aditivos Alimentarios (1995) definida por el Codex Alimentarius se describe que la dosis máxima de Sacarinas para Confituras, jaleas y mermeladas debe ser de 200mg de aditivo por 1 kg de alimento.

1.4.2.6 Sucralosa

Es un derivado de la sacarosa, sin embargo es de 500 a 600 veces más dulce que éste. No tiene regusto amargo, y soporta muy bien las altas temperaturas (Badui, 2006). En la Norma General para los Aditivos Alimentarios (1995) definida por el Codex Alimentarius se describe que la dosis máxima de Sucralosa para Confituras, jaleas y mermeladas debe ser de 400mg de aditivo por 1 kg de alimento.

1.4.3 Acidificantes y tampones

Los ácidos se encuentran de forma natural en las frutas, pero en diferentes proporciones. Por ello, es frecuente el uso de ácidos provenientes de frutas como es el ácido cítrico, ácido málico y ácido tartárico. Los ácidos son necesarios para alcanzar el pH óptimo de la gelificación, ajustar y mejorar el perfil de sabor, dar brillo al producto final, y facilitan la extracción de pectina de las frutas ayudando así a la gelatinización. Además, los ácidos evitan la cristalización de los azúcares y actúan como conservante, aumentando así la vida útil del producto. También se utilizan sales tampón como citrato trisódico para ajustar el pH (Broomfield, 1997). A nivel artesanal, el ácido cítrico es sustituido por zumo de limón.

1.4.4 Gelificantes

Los aditivos alimentarios gelificantes son aquellos que aportan textura al producto mediante la formación de un gel. En general, estos compuestos pueden ser proteínas o carbohidratos, que al entrar en contacto con el agua forman redes tridimensionales creando una apariencia sólida, a pesar de que el alimento en su mayoría sea líquido (European Food Information Council, 2009). Existe un agente gelificante natural en las frutas llamado pectina.

1.4.4.1 Pectina

Esta sustancia es la responsable de la formación del gel en la mermelada. La cantidad y calidad de este agente es muy variable del tipo de fruta, de su grado de maduración, e incluso de la cosecha. La pectina industrial es extraída de la cáscara de las frutas cítricas y de las manzanas, después de la extracción de sus jugos. La pectina de manzana suele ser de

un color algo más oscuro, debido a las reacciones de pardeamiento enzimático, por ello se utiliza mayormente en mermeladas de color oscuro (Downing, 1996).

Las sustancias pécticas normalmente están en la lámina media de los tejidos vegetales, y cambian a lo largo de la maduración del fruto. Por decirlo de otro modo, son el pegamento de las células vegetales. A medida que la fruta madura, la propectina insoluble se convierte en pectina soluble. La molécula de pectina está compuesto por largas cadenas de ácido poligalacturónico con el grupo carboxilo libre, o bien con el carboxilo esterificado por metanol, es decir, parcialmente metoxilado (Broomfield, 1997).

En las frutas más maduras, existen enzimas que degradan las cadenas de ácido poligalacturónico en otras más cortas, produciendo una pectina con características gelificantes bajas. (Broomfield, 1997). Es recomendable calcular el contenido de pectina útil de la fruta antes de realizar el lote industrial de mermelada, y de esta forma, estandarizar las características del producto final. Debido a las grandes variaciones naturales de la fruta, es muy usual que se agregue pectina extraída industrialmente al producto, la cual puede ser en polvo o líquida.

Existe la posibilidad de que la pectina precipite en la disolución si no existe suficiente cantidad de agua, haciendo que sea muy difícil efectuar una cocción satisfactoria y una adecuada gelificación si la pectina ya se ha insolubilizado. Se recomienda un valor mínimo de 120g de agua por 100g de producto final.

1.4.4.2 Tipos de pectina

En las frutas, gran parte de los grupos ácidos del ácido galacturónico están esterificados por metanol. El metanol se pierde rápidamente por hidrólisis ácida o enzimática, dejando al grupo ácido libre. En función del porcentaje de ácido galacturónico esterificado, las pectinas se clasifican como de alto metoxilo, cuando este porcentaje es superior al 50%, o de bajo metoxilo cuando el porcentaje es inferior. (Badui, 2006).

1.4.4.2.1 Pectinas de alta metoxilación

Las pectinas presentes de forma natural son altamente metoxiladas. Los fabricantes de pectina suelen modificar químicamente a las moléculas de pectina para modular su velocidad de gelificación. Si la cadena de ácido galacturónico posee un alto porcentaje de grupo hidroxilo metilados pueden pertenecer a la categoría de “rápida gelificación”. La Figura 1 muestra un ejemplo de molécula de pectina de alta metoxilación.

Cuando una pectina altamente metoxilada forma parte de una disolución ligeramente ácida, sus grupos ácido carboxílico tienen a disociarse, esta disociación se controla con ajuste del pH al óptimo valor de acuerdo a cada pectina. La adición de azúcar tiene un efecto deshidratante sobre la pectina, lo que provoca una reducción en la solubilidad. Tanto la calidad del gel, como la velocidad de gelificación, están gobernadas por el grado de metilación, la cantidad de pectina, el contenido de azúcar, el tipo de azúcar, el pH y la temperatura de la disolución. Una pectina altamente metoxilada rápida tiene una temperatura de gelificación más alta que otra pectina altamente metoxilada lenta. Si se eliminan más grupos metoxilados, la pectina se torna de baja metoxilación y gelifica a concentraciones de azúcar más bajas. (Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, 2009)

Para obtener geles de pectina de alto metoxilo, el pH de la solución debe ser bajo. Esto permite que los grupos ácidos minoritarios se encuentren en su forma ionizada. De esta forma, las cadenas pécticas de alto metoxilo pueden unirse mediante puentes de hidrógeno o por interacciones hidrofóbicas de los grupos metoxilo, incluyendo los grupos ácidos no ionizados, siempre y cuando, exista un material hidrófilo fuerte que retire el agua, en este caso es el azúcar. Entre pH de 1 a 3,5 y con un contenido de azúcar del 55% al 85% las pectinas de alto metoxilo formarán buenos geles. (Calvo, 2004). Para cada tipo de pectina con un grado de metoxilación concreto existe una combinación óptima de concentración de azúcar y pH, aunque el pH puede ser establecido dentro de un rango.

El grado de esterificación de las pectinas de alto metoxilo influye mucho sobre sus propiedades de gelificación. A mayor grado de esterificación, mayor será la temperatura a la que forman gel, y de acuerdo a esto, las pectinas pueden ser rápidas o lentas. Además,

las pectinas con un grado de esterificación mayor forman geles irreversibles térmicamente, por otro lado, las pectinas con grado de esterificación menor forman geles reversibles. (Calvo, 2004)

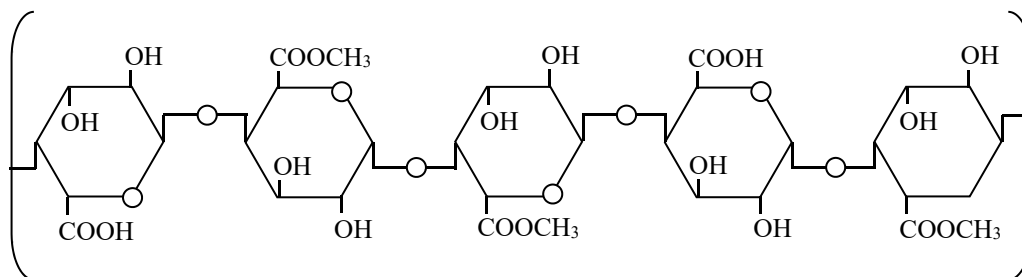


Figura 1. Pectina de alta metoxilación con un grado de esterificación del 60%

Fuente: Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, ICTA. (2009).

Las pectinas de alto metoxilo pueden encontrarse según los siguientes tres tipos:

- a. Gelificación de pectina lenta: porcentaje de esterificación de 60% a 67%
- b. Gelificación de pectina mediana: porcentaje de esterificación de 68% a 70%
- c. Gelificación de pectina rápida: porcentaje de esterificación de 71% a 76%

Pectina de gelificación rápida se utiliza mayormente con productos que contienen alto contenido de pulpa y pedazos de frutas en su formulación. Pectina de gelificación lenta se utiliza mayormente en productos que contienen bajo contenido de pulpa, y que no tienen pedazos de fruta en su formulación.

1.4.4.2.2 Pectinas de bajo metoxilación

Las pectinas de baja metoxilación se utilizan para productos con bajo contenido de azúcar. Sin embargo, necesita calcio como catalizador para empezar el proceso de gelificación. La unión de las cadenas del ácido galacturónico en pectinas con bajo metoxilo se forma a través de los iones de calcio, los cuales forman puentes entre las cargas negativas. Se debe dosificar la cantidad adecuada de calcio dependiendo de cada pectina, que aproximadamente es de 500ppm. La consistencia máxima de las pectinas de bajo metoxilo es cuando las cantidades de calcio sean entre 20mg a 100mg por 1 gramo de pectina. Caso contrario se puede dar una saturación, en la cual el calcio extra no tiene efecto, y hasta puede debilitar el gel. La presencia de azúcar disminuye la cantidad de calcio a dosificar.

Por lo tanto, a menor cantidad de azúcar, se debe utilizar pectinas de menor metoxilación para obtener la misma consistencia. (Calvo, 2004). La Figura 2 muestra un ejemplo de molécula de pectina de baja metoxilación.

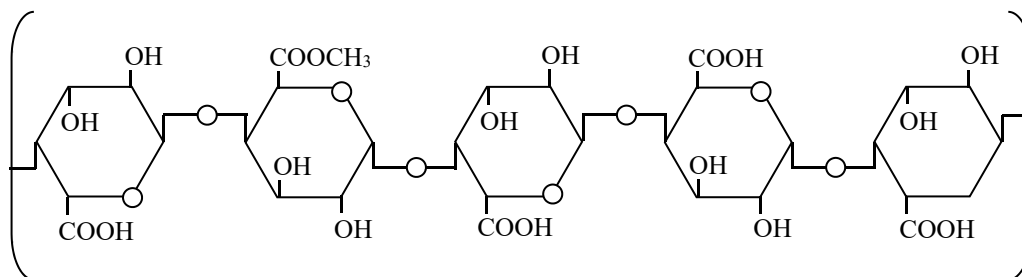


Figura 2. Pectina de baja metoxilación con un grado de esterificación del 20%

Fuente: Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, ICTA. (2009).

1.4.4.2.3 Pectinas amidadas

Mediante procesos químicos se puede obtener pectinas amidadas a partir de pectinas de bajo metoxilo, las cuales tiene la formación de amidas con amoníaco en algunos grupos carboxilo. Se puede convertir en grupos amida hasta un 20% de los grupos metoxilo de la cadena de ácido galacturónico. También forman geles con presencia de calcio, sin embargo, tienen una mayor tolerancia a este ión. Con mayor porcentaje de amidación, la temperatura de formación de gel también es mayor. (Calvo, 2004). La Figura 3 muestra un ejemplo de molécula de pectina de alta metoxilación.

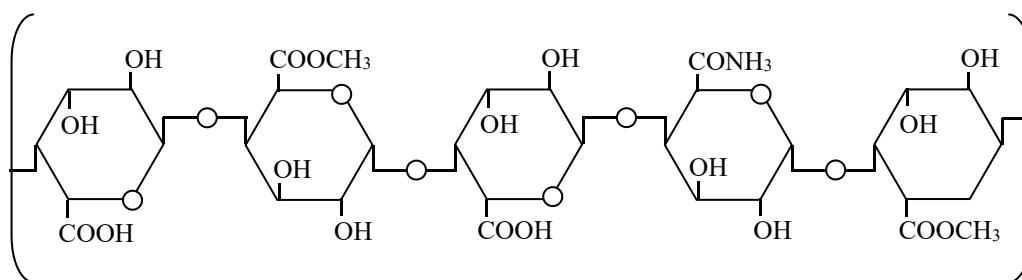


Figura 3. Pectinas amidadas con un grado de esterificación de pectina del 40% y 20% de amidación

Fuente: Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, ICTA. (2009).

Las pectinas de bajo grado de metoxilación y las amidadas se comportan de un modo similar ya que ambas dependen de la presencia de calcio para la gelificación. La fuerza del

gel se ve menos afectada por el contenido de azúcar, e incluso, alguna de estas pectinas pueden formar geles con una concentraciones de azúcar inferior al 20%. (Broomfield, 1997) Estas pectinas son importantes para la fabricación de confituras bajos en azúcar. Con este tipo de productos bajos en azúcar, se puede utilizar también otros gelificantes como alginatos.

1.4.5 Conservantes

Los conservantes son agentes químicos utilizados en la manufactura de alimentos para preservar el estado del producto por un tiempo más prolongado. Esto se logra mediante la prevención de posibles daños tanto físicos, químicos o biológicos. En el caso de las mermeladas, un daño físico puede ser la cristalización del azúcar presente en el producto. Un daño químico puede ser la producción excesiva de azúcar invertido a partir de la sucralosa. Y finalmente, un daño biológico puede ser la contaminación microbiológica de la mermelada. (Downing, 1996) Los conservantes más utilizados en estos productos son:

1.4.5.1 Ácido sórbico

Es una sustancia conservadora que se utiliza principalmente para detener el crecimiento microbiano, de forma que prolonga la vida útil del producto. Es poco soluble en agua, por lo que su uso en mermeladas se dificulta (Badui, 2006). En la Norma General para los Aditivos Alimentarios (1995) definida por el Codex Alimentarius se describe que la dosis máxima de ácido sórbico para Confituras, jaleas y mermeladas debe ser de 1g de aditivo por cada 1 kg de alimento.

1.4.5.2 Ácido benzoico, Benzoato de potasio / sodio / calcio.

Es una sustancia conservadora que inhibe el crecimiento microbiano, efectivo contra bacterias, mohos y levaduras. Tiene la característica de ser altamente soluble en agua, por lo que su uso es muy frecuente (Badui, 2006) En la Norma General para los Aditivos Alimentarios (1995) definida por el Codex Alimentarius se describe que la dosis máxima de los para Confituras, jaleas y mermeladas debe ser de 1g de aditivo por cada 1 kg de alimento.

1.4.6 Antiespumantes

Son compuestos basados en siliconas, aceites o polímeros que eliminan o previenen la formación de espuma en mezclas líquidas o sólidas. El agua en la mezcla tiene una importante función como medio de transporte, y la espuma interrumpe este proceso. Adicionalmente, el aire atrapado en el alimento presenta un riesgo para la reproducción de organismos microbiológicos aerobios, por lo que su eliminación es importante. La función de antiespumante es introducir defectos en la lámina de espuma mediante partículas finas hidrofóbicas, las cuales rompen la burbuja de espuma y así escapa el aire atrapado (Badui, 2006). En alimentos, los antiespumantes más utilizados son basados en siliconas, como el di-metil-poli-siloxano, ya que son efectivos, duraderos y seguros.

2. PROCESO PRODUCTIVO

La manufactura de mermeladas es muy similar para la gran variedad de productos que se puede obtener, tanto en sabores y colores, como en tamaños y presentaciones. Afortunadamente, este proceso corresponde en su mayoría a una producción lineal, por lo que sus procesos son continuos, desde la recepción de la materia prima hasta la obtención del producto final. Antes de realizar el diseño del proceso productivo, es importante estudiar y analizar la estimación de venta y así obtener la cantidad de producción diaria por referencia. Se debe establecer los parámetros de control de cada operación mediante diagramas de flujo. En el presente capítulo se detalla el flujo productivo el cual se resume en la Figura 4.

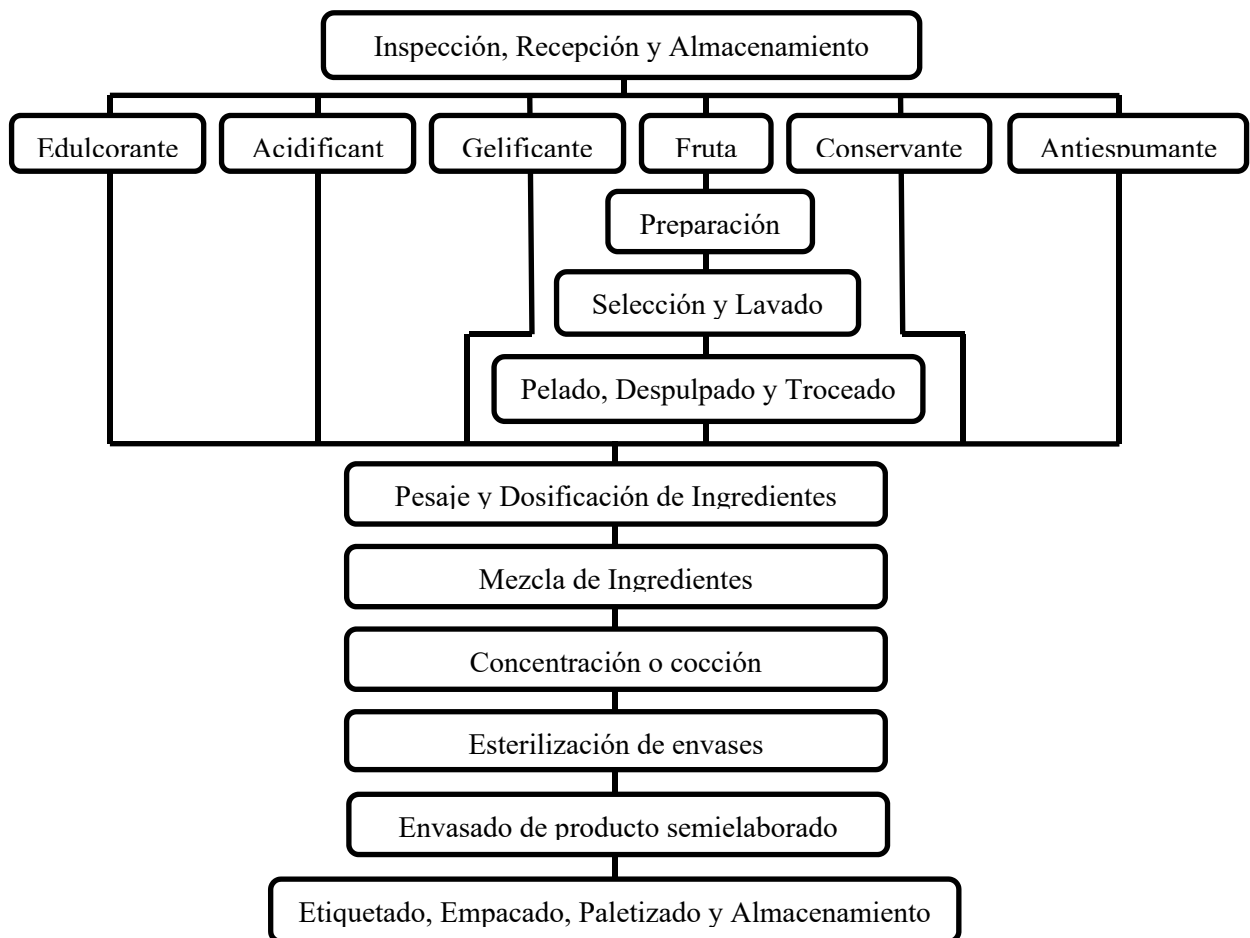


Figura 4. Flujograma del proceso de elaboración de mermeladas

2.1 Inspección, Recepción y Almacenamiento de Materia Prima

Este proceso se refiere a todos los pasos a seguir para que cada una de las materias primas entregadas por los proveedores puedan ser ingresadas y utilizadas en el proceso de transformación del producto (Dirección de Innovación y Desarrollo Productivo, 2009). Esta gran etapa es muy importante, ya que el fabricante de mermeladas debe asegurarse que todas sus materias primas se encuentran bajo los estándares de calidad definidos por la empresa, los cuales definen en gran parte la calidad de su producto terminado. Es por ello que esta etapa se divide en los siguientes pasos:

2.1.1 Inspección inicial

Se realiza cuando el proveedor de determinada materia prima abastece a la planta productiva. La persona encargada del ingreso de todos los materiales debe estar capacitada en temas de calidad como buenas prácticas de transporte y almacenamiento, tanto para la recepción de las materias primas, como material de empaque. Es necesario aclarar que en este paso, la inspección se realiza mediante observación de las características externas del material. Con el objetivo de evitar enfrentamientos con los proveedores en esta etapa, el detalle de la inspección que se realizará en cada ingreso debe estar incluido en el Acuerdo de Calidad elaborado y firmado con cada proveedor. Los ítems mínimos a evaluar deben ser:

- Sellos del contenedor intactos. Número de candados de acuerdo a los detallados en la guía de remisión.
- La cantidad de materia prima debe coincidir con la guía de remisión y el pedido de producto.
- Limpieza adecuada del contenedor o transporte donde llega la materia prima.
- Ausencia de olores extraños.
- Ausencia de plagas. Se debe tener especial cuidado de esta inspección al recibir las frutas.
- Ausencia de humedad.
- El contenedor debe ser cubierto.
- Las cajas o contenedores de la materia prima no deben estar rotos, astillados o golpeados.

- En el caso de los aditivos, la materia prima debe estar completamente sellada, sin exposiciones al ambiente.
- Toda materia prima debe ingresar solo si el proveedor envía el Certificado de Calidad correspondiente a los lotes enviados.

Una vez aprobado el ingreso de la materia prima a la bodega, este debe ser almacenado y etiquetado en un espacio definido para las materias primas en cuarentena, ya que aún no se ha aprobado el material por el Departamento de Calidad.

2.1.2 Inspección en laboratorio

El Departamento de Calidad de la fábrica debe analizar cada una de las materias primas y aprobar o rechazar su uso en la planta productiva, de acuerdo al cumplimiento de los parámetros de calidad de cada una de ellas. Para esto, debe obtener una muestra representativa de la cantidad de materia prima ingresada y hacer análisis en el laboratorio. En la industria de jaleas y mermeladas, los análisis de laboratorio mayormente utilizados:

- Fruta:
 - Análisis Físicos: características organolépticas (como: color, olor, sabor, apariencia y firmeza), % de frutos dañados (golpes, quemaduras de sol, deterioro microbiano y daño por plagas), % de impurezas, % de frutos inmaduros, etc.
 - Análisis Químicos: pH, %sólidos solubles, % humedad y % acidez.
 - Análisis Microbiológicos: recuento total de bacterias mesófilas, hongos y levaduras.
- Pectina:
 - Análisis Físicos: color, olor, apariencia.
 - Análisis Químicos: % humedad, poder gelificante (Grados SAG).
- Azúcar:
 - Análisis Físicos: color, olor, sabor, apariencia, % puntos negros (impurezas), solubilidad en agua.
 - Análisis Químicos: pH, % humedad.
- Ácido cítrico:
 - Análisis Físico: color, olor, sabor, apariencia, solubilidad en agua.
 - Análisis Químicos: pH, % humedad

- Conservante:
 - Análisis Físico: color, olor, sabor, apariencia, solubilidad en agua
 - Análisis Químico: % humedad
 - Análisis Microbiológico: eficacia de poder conservante.

Para realizar los análisis mencionados, el laboratorio debe contar con los siguientes equipos: refractómetro, potenciómetro, cámaras de temperatura, buretas, cultivos microbiológicos, vasos de precipitación, pipetas y reactivos para cada uno de los ensayos.

Una vez que se ha realizado los análisis de cada materia prima ingresada, estas deben ser etiquetadas como “Aceptado” en caso de que hayan cumplido con las especificaciones de calidad, o como “Rechazado” en caso de que no. En ese momento deben ser almacenadas en lugares definidos para cada estado. Al proceso productivo deben ingresar únicamente las materias primas que estén con estado de “Aceptado”.

2.2 Preparación de la fruta

Es común que todas las frutas que se desean utilizar en el proceso productivo requieran pasar por algún tipo de proceso previo. Estos pasos dependen del tipo de fruta con la que se va a realizar el proceso y del tipo de almacenamiento que tuvo. En el caso de utilizar fruta fresca, se debe tener un proceso de selección, lavado, pelado troceado y/o despulpado. Si la fruta fue almacenada con baja temperatura, solo es necesario un proceso de descongelamiento, sin embargo, se debe tener cuidado con el aumento de humedad que puede tener esta materia prima durante este paso. Por otro lado, si la fruta fue esterilizada, se debe realizar un proceso de des envasado y drenado. Finalmente, si la fruta ha sufrido un proceso de conservación química, debe pasar por un proceso de eliminación del dióxido de azufre, generalmente por ebullición (Broomfield, 1997). La mayor cantidad de fabricantes de confituras, jaleas y mermeladas trabaja con fruta fresca, por lo que se detalla a continuación los procesos que se deben seguir al preparar este tipo de fruta.

2.3 Selección de la fruta

La etapa de selección, es un proceso de clasificación de las frutas, dejando en la línea productiva aquellas que se encuentren en buen estado, con una madurez adecuada, color característico y aroma agradable. Se debe eliminar las frutas que se encuentren con daños como oxidación, aplastamiento, sobre-maduración, estado muy inmaduro o de podredumbre. Si la fruta presenta golpes o lesiones en la piel de forma superficial, se puede retocar el área afectada con cuchillo, de forma que se rescate la mayor parte de fruta en buena condición. Esta etapa es importante ya que la calidad de la mermelada dependerá en gran parte de la fruta que se utilice para su elaboración.

2.4 Lavado de la fruta

La etapa de lavado de fruta se realiza para retirar todo tipo de impurezas, suciedad, restos de tierra y partículas extrañas que haya podido adquirir esta materia prima en el proceso de post-cosecha, transporte y almacenamiento hasta llegar al proceso productivo. Este proceso se puede realizar mediante inmersión, agitación o aspersion. El lavado se realiza con agua acompañada de algún agente del tipo saponificante o desinfectante, como jabón, detergente o cloro. Este último es el más utilizado, en una concentración de 0,05% a 0,2% con un tiempo de inmersión no menor a 15 minutos (Coronado & Hilario, 2001). Dependiendo de la fruta a tratarse, algunas pueden ser cepilladas como el caso de las piñas. En otros casos como la frutilla, no se debe cepillar ya que puede causar heridas en la piel de la fruta. Posteriormente, se realiza un enjuague con abundante agua potable para eliminar todo trazo residual de cloro en la fruta. Finalmente, se realiza un proceso de secado de la frutas. Por lo general, se deja a la fruta en canastas perforadas para eliminar el exceso de agua.

2.5 Pelado de la fruta

Este proceso no es necesario para todas las frutas que se utilizan en la elaboración de mermeladas, debido a que algunas frutas son procesadas con todo y su piel, como las frutillas y moras. El pelado es la separación de la cáscara de la fruta de su pulpa, como en el caso de la piña. Este proceso se puede realizar por un método manual, mecánico o

químico. Además, el subproducto de cáscara puede ser almacenada para usarla en la producción de vinagre.

2.6 Despulpado de la fruta

Al igual que el proceso anterior, no es necesario realizar un despulpado a todas las frutas, más bien depende del tipo de producto que se va a elaborar. Se recomienda realizar despulpado cuando la fruta tiene pepas que no se desean en el producto terminado, o cuando se desea realizar una mermelada limpia sin que se sientan los trozos de fruta. Este proceso se puede realizar con instrumentos mecánicos como despulpadoras o licuadoras, y en ocasiones, posteriormente pasan por un proceso de filtrado.

2.7 Troceado de la fruta

Cuando no se realiza el despulpado, se debe trocear la fruta, ya sea con un corte grueso o fino, dependiendo de la preferencia del consumidor. El objetivo de este proceso es disminuir el tamaño de la fruta, y fragmentarlo en pedazos más pequeños de forma que sean homogéneos y puedan distribuir de mejor forma en el producto terminado (Dirección de Innovación y Desarrollo Productivo, 2009). Adicionalmente, se debe tomar en cuenta que este proceso impacta en la apariencia y textura del producto terminado, ya que influye en la formación del gel. Con cortes más finos existe una mayor cantidad de agua libre en el producto, por lo que el tiempo de cocción aumenta y la degradación de la pectina es mayor. Por otro lado, con cortes más gruesos, la extracción de pectina de la fruta es menor disminuyendo la calidad del gel. Por esto es importante estandarizar el tamaño del corte para cada tipo de mermelada que se va a realizar. El proceso de troceado se puede realizar por medio de frotación, impacto, corte o compresión.

2.8 Pesaje y dosificación de ingredientes

La cantidad de materia prima a pesar se realiza de acuerdo a la formulación definida para cada producto. Este proceso debe realizarse con mucho cuidado, ya que la variación en

algunos aditivos puede provocar el rechazo completo del lote de producción. Los datos de pesaje deben ser anotados en cada lote, con el objetivo de trazabilidad y para calcular el rendimiento al terminar la producción. El pesaje debe realizarse con la ayuda de una balanza, la cual debe estar calibrada y en un lugar estable. Se debe tomar en cuenta que la balanza tenga la precisión adecuada para los aditivos que se van a pesar en ella.

2.9 Mezcla de ingredientes

Los ingredientes son mezclados en el mismo concentrador donde se va a realizar la cocción. La agitación de la mezcla debe ser suave, para no romper los trozos de fruta, pero lo suficientemente rápido para que no deje quemar el producto. Para esto, la marmita o concentrador debe contar con un agitador que pueda regular su frecuencia, y que cuente con espátulas en sus extremos para remover la mezcla adherida en las paredes. La agitación debe ser constante para evitar la caramelización del azúcar, y así facilitar la formación del gel.

Para la mezcla de los ingredientes, se debe tener especial consideración en la adición de la pectina y del ácido cítrico por su funcionalidad en el producto.

2.9.1 Adición de ácido cítrico

El ácido cítrico tiene la función de regulador de pH y conservante, ya que alarga la vida útil del producto. El ácido cítrico debe ser añadido después de la cocción inicial de la fruta con una parte del azúcar. Debido a que el ácido cítrico es altamente soluble y no tiende a formar aglutinaciones, se puede agregar directamente a la mezcla.

2.9.2 Adición de la pectina

La pectina es un ingrediente estabilizador utilizado comúnmente en la industria alimenticia, y como tal, es un coloide hidrofílico de alta solubilidad. Por lo tanto, si la pectina es colocada de forma incorrecta, va a tender a realizar grumos en la solución, los cuales son muy difíciles de dispersar. Este efecto se debe a que una capa exterior de la masa de pectina realizará un gel que impedirá la hidratación de la pectina interior.

Independientemente de la cantidad de pectina que se utilice, es importante revisar que se encuentre bien disuelta antes de seguir con la elaboración del producto. Además, se debe considerar el tipo y las condiciones ideales (en cuanto a pH, sólidos solubles totales, temperatura) en las que actúa la pectina a utilizar.

En la industria, se suelen utilizar 3 métodos para la disolución de pectina (Downing, 1996), los cuales son: adición directa, adición por dispersión, adición por mezcla en azúcar.

- ***Adición directa:*** la pectina es disuelta directamente en agua a temperaturas entre 60°C a 100°C con ultra agitación, es decir, con aspas a la velocidad más alta. En este método, no se recomienda tener a la pectina por mucho tiempo a alta temperatura, ya que se empieza a degradar por hidrólisis.
- ***Adición por dispersión:*** una forma sencilla de agregar la pectina es colocarla en un jarabe concentrado de azúcar, aproximadamente de 65% de sólidos solubles. La ventaja de este método es que permite realizar la agitación a temperatura ambiente. Después de la completa dilución, se debe activar a la pectina calentándola en una solución a unos 85°C a 100°C por tres a cinco minutos, hasta que se encuentra lista para su uso.
- ***Adición por mezcla en azúcar:*** es el método más utilizado. Se coloca la pectina en la cuarta o quinta parte del azúcar, sin haber agregado nada de agua. Se hace una mezcla en seco para asegurar la dispersión de la pectina. Finalmente se coloca el agua a una temperatura de 70°C a 100°C, y se agita la solución a velocidad moderada.

2.10 Concentración o Cocción

Es la etapa más delicada del proceso de elaboración de mermeladas, ya que transforma la mezcla en producto terminado. Se debe considerar las características de todas las materias primas y combinarlas con el control del proceso para así lograr un producto final con excelentes características. En esta etapa, el producto experimenta cambios físicos,

químicos y biológicos, los cuales provocan el mejoramiento y desarrollo de las características organolépticas, tales como color, sabor, aroma, textura, aspecto, e incluso, sus propiedades nutricionales (Broomfield, 1997). En el proceso de cocción se rompen las estructuras celulares de la fruta y se logra la mayor cantidad de extracción de pectina. El tiempo de cocción depende del tipo de mermelada que se va a realizar, sin embargo, éste no debe ser excesivo, ya que puede provocar la degradación de la pectina, cambios en el sabor de la fruta, y caramelización del azúcar acompañados con cambios de color.

La cocción puede ser realizada a presión atmosférica en marmitas abiertas, o con vacío en concentradores cerrados. En caso de utilizar marmitas o calderas abiertas, éstas deben estar provistas de una camisa de vapor, para que el calentamiento se dé por la condensación del vapor a alta presión. Adicionalmente, se puede aumentar la superficie de calentamiento, mediante la adición de serpentines de vapor internos. Por otro lado, la elaboración del producto con vacío conserva las características organolépticas del producto de mejor manera, y la penetración del azúcar en la fruta es más rápida, lo que aumenta la productividad operativa de la planta. Se puede utilizar concentradores que tienen evaporadores de placa, o con intercambiadores de calor de superficie rascada. Además, se cuenta con termómetros y medidores de presión, los cuales deben ser revisados continuamente. Como dato general, la presión de vacío con la que se trabaja es de 700 a 750mmHg, consiguiendo temperaturas de cocción entre 60 a 70°C. (Coronado & Hilario, 2001).

En el proceso de cocción, la formación de espuma puede representar un problema, especialmente al inicio de esta etapa de calentamiento. Para evitar pérdidas de rendimiento por espuma, se suele colocar antiespumantes. En la evaporación se logra eliminar entre un 25% a un 35% de agua de la mezcla, consecuentemente se logra concentrar el producto final. Cuando la mezcla alcanza los 45°Brix aproximadamente, se debe adicionar el azúcar que está mezclado con la pectina. El punto final de la cocción debe estar determinada por el refractómetro, cuando la mezcla alcance como mínimo los 65°C en temperatura ambiente. Una vez que se ha terminado la evaporación, se debe realizar un control de calidad del producto semielaborado para asegurar el pH, sólidos solubles y consistencia adecuada de acuerdo a la Norma Técnica de cumplimiento vigente.

2.11 Esterilización de envases de vidrios

Esta etapa consiste en lavar los frascos de vidrio con agua y detergente o cloro, enjuagarlos bien con agua a temperaturas superiores a los 90°C, y posteriormente someterlos a un secado boca abajo (Downing, 1996). El objetivo es asegurar que los envases estén libres de cualquier suciedad externa o contaminación microbiológica que pueda afectar al producto terminado. De esta forma se elimina posibles contaminaciones en la mermelada de fruta. Posteriormente, los envases son transportados a la sección de envasado de producto.

2.12 Envasado

El llenado de producto se puede realizar en envases adecuados que van desde los 5g en presentación de sachet, hasta 20 toneladas para uso de fabricantes de productos horneados. La variedad de envases en los que se puede presentar las jaleas y mermeladas depende de la imaginación y presupuesto del fabricante. Normalmente, se trabaja con vidrio o plástico resistente. El llenado se realiza mediante dosificadores volumétricos de pistón con el producto caliente, no menos de 85°C, lo que asegura una gelificación adecuada, fluidez del producto en el llenado, formación de vacío dentro del envase y esterilidad comercial (Downing, 1996). Al llenar los envases, se debe dejar aproximadamente un centímetro de espacio de cabeza (espacio entre la superficie del producto y el fin del frasco). Inmediatamente después de que el envase ha sido llenado, se debe proceder con el sellado (Dirección de Innovación y Desarrollo Productivo, 2009). Luego pasa a un proceso de enfriamiento con chorros de agua fría, lo que permite la generación de vacío dentro del envase por contracción del producto y adicionalmente, se realiza una limpieza exterior en caso de que existan residuos de producto.

2.13 Etiquetado de Producto Terminado

Finalmente, se procede con el etiquetado de los envases, el cual debe cumplir la Norma Técnica del Instituto Ecuatoriano de Normalización 1334-1 (2014) referente al rotulado de productos alimenticios para el consumo humano, la cual detalla como requisitos lo siguiente:

- Nombre del alimento
- Lista de ingredientes
- Contenido neto
- Número de Registro Sanitario
- Identificación del fabricante, envasador, importador y distribuidor
- Ciudad y país de origen
- Identificación del lote
- Marcado de la fecha e instrucciones para la conservación
- Instrucciones para el uso
- Marca Comercial
- Precio de venta al pública

2.14 Empacado, Paletizado y Almacenamiento

El producto terminado es colocado en cajas, las cuales son cerradas y selladas. Éstas son apiladas en palets de forma estable y envueltas con polietileno retráctil. Por último, estos palets son transportados a bodega en donde son almacenados en una ubicación de cuarentena. La bodega de almacenamiento de producto terminado debe ser en un lugar fresco, seco, protegido de la entrada de plagas, limpio y con circulación de aire para mantener el producto en buen estado. El producto siempre debe estar sobre palets, y nunca en contacto directo con el piso.

2.15 Liberación de Producto Terminado y Distribución

Una vez que el producto ha sido almacenado en un lugar específico para cuarentena de producto terminado, el Departamento de Calidad de la empresa debe realizar los análisis en laboratorio del producto terminado para determinar su estado final. Los requisitos solicitados por la Norma Técnica del Instituto Ecuatoriano de Normalización 0419 (1988) se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Requisitos de la mermelada de frutas según NTE 0419 (1988)

Análisis	Unidad de medida	Límite Mínimo	Límite Máximo
Sólidos solubles	% m/m	65	-
pH		2,8	3,5
Ácido ascórbico	mg/kg	-	500
Dióxido de azufre	mg/kg	-	100
Benzoato sódico, sorbato potásico, solo o combinados	mg/kg	-	1 000
Mohos	% campos positivos	-	30

Fuente: Norma Técnica del Instituto Ecuatoriano de Normalización 0419 (1988).

Si el producto es colocado en estatus de “Liberado”, está listo para ser enviado a los Centros de Distribución. En caso de que el producto presente un problema, debe ser identificado como “Retenido” hasta decidir el destino final del producto.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Definición de proceso

Se entiende que un proceso es una actividad o conjunto de actividades en las que ingresa uno o varios insumos llamados entradas, los cuales son transformados con el objetivo de agregar valor, y así terminar con uno o varios productos diferentes llamados salidas, los cuales serán entregados a un cliente interno o externo.

La definición establecida por la Organización Internacional de Estandarización en la Norma Internacional de Sistemas de Gestión de Calidad – Fundamentos y Vocabulario ISO 9000 (2005) de proceso es “conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados”. Se aclara que los elementos de entrada para un proceso son generalmente resultados de otros procesos, los cuales son planificados y puestos en práctica bajo condiciones controladas para generar valor dentro de una organización.

3.2 Elementos de proceso

Existe una gran infinidad de procesos, sin embargo todos cumplen una misma esencia y objetivo de transformación, y se componen de los siguientes elementos (Osorio, 2010):

Misión: es el fin para el cual fue creado el proceso y tiene relación directa con el objetivo de transformación.

Entrada: pueden ser componentes tangibles o intangibles, y son los elementos con los cuales se realiza el proceso de transformación.

Transformación: es la actividad o conjunto de actividades que agrega valor a la entrada y genera una salida para el cliente interno o externo.

Salida: es el producto o servicio generado de la transformación, y es el objetivo en sí por el cual se realiza el proceso.

Control: sistemas de medida que permiten analizar el desempeño del proceso, y generan datos que deben ser analizados constantemente para disminuir variaciones a lo largo de la actividad.

Recursos: todos los insumos de apoyo que necesita el proceso para cumplir su objetivo. Como ejemplo se tiene los recursos humanos, tecnológicos, mecánicos, etc.

Límite del proceso: es la delimitación del alcance que tienen las actividades del proceso. Tiene el objetivo de no duplicar esfuerzo de trabajo con otras áreas.

3.3 Diseño de Experimentos

Un experimento está definido como la acción de hacer operaciones destinadas a descubrir, comprobar o demostrar determinadas particularidades en un proceso o sistema (Montgomery, 2001). Los experimentos son muy utilizados en el campo de la investigación y ciencia, al punto que se consideran parte del proceso científico. Las personas que utilizan mayormente los experimentos son investigadores, sin embargo, cualquier persona que se encuentre capacitada en diseño estadístico de experimentos podría hacerlo, ya que es un proceso sencillo.

En el campo industrial es frecuente hacer experimentos, que en su mayoría se realizan para resolver un problema o confirmar una idea. Lo común es realizar estos experimentos sobre la marcha del proceso, con experiencia o intuición, bajo un esquema de ensayo y error. Son muy pocas las empresas que realizan un sistema planificado de diseño estadístico de experimentos para obtener resultados y respuestas a todas las interrogantes ante la problemática, a pesar de ser la forma más eficaz de realizar las pruebas y obtener evidencia objetiva del proceso. Los objetivos para realizar experimentos es generar conocimiento y aprendizaje de manera muy eficiente. Al final, el resultado que se obtiene es (Montgomery, 2001):

- Determinar las variables que más influyen en los resultados.
- Determinar el valor para cada variable con el objetivo de acercarse a la respuesta obtenida a la respuesta deseada.
- Determinar el valor para cada variable de los factores controlables con el objetivo de disminuir la variación de las respuestas.

- Determinar el valor para cada variable de los factores incontrolables con el objetivo de disminuir la variación de las respuestas.

Estos objetivos al ser aplicados en la industria sirven para mejorar y optimizar los procesos, ya que logra controlar y disminuir la variabilidad de los mismos.

3.4 Etapas del Diseño Experimental

Al realizar un diseño experimental, es fundamental decidir el modelo a utilizar, los factores, niveles y repeticiones que se necesitan para obtener la mayor información posible al menor costo. A continuación se describen las etapas que se deben seguir para aplicar correctamente un diseño experimental según la problemática que se desea analizar (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

3.4.1 Planeación del diseño experimental

La planificación del diseño experimental permite un trabajo con eficacia, eficiencia y efectividad, es decir que permita obtener la mayor cantidad de información con el menor uso de recursos y tiempo (Ross, 1996). De hecho, el éxito de un experimento radica principalmente en la calidad de la planificación del mismo.

Primeramente se debe investigar y entender cuál es la problemática, por qué es importante, cuál es el objetivo, y la magnitud del problema para lograr una correcta delimitación el estudio. Posteriormente se debe escoger las variables de respuesta que van a reflejar el resultado del experimento, y verificar que la medición de éstas sean totalmente confiables, es decir, que las mediciones sean precisas y exactas. También se debe definir los factores controlables y sus niveles para obtener las variables de respuesta, según la influencia que se ha observado. Esto no significa que se estime exactamente los factores que influyen, ya que es exactamente esto lo que se va a demostrar en el estudio. Este paso también implica que se debe determinar el número de repeticiones de cada tratamiento a realizar de acuerdo al tiempo, costo y precisión deseada. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Para que el experimento sea válido, es importante obtener una muestra significativa que permita hacer inferencias sobre las observaciones obtenidas con los resultados hacia la

descripción de características de la población o universo. En su gran mayoría, las poblaciones que se desea estudiar son infinitas, o muy grandes, por lo que se requiere extraer una muestra de individuos para estudiar sus características, y esto se realiza mediante técnicas de muestreo. Se debe tener cuidado al escoger la muestra que se va a estudiar para evitar sesgos de selección, el cual se da por exclusión de ciertos miembros de la población provocando que los resultados del experimento no serían válidos para dicha población de estudio (Pagano & Gauvreau, 2001). A continuación se explican distintos métodos de muestreo:

3.4.1.1 *Estimación del tamaño de la muestra*

Al planificar un diseño experimental, los investigadores deben determinar el número de individuos que formarán la muestra para que los resultados obtenidos puedan representar a la población total, y así lograr una inferencia estadística que sea válida. Se puede realizar esta afirmación gracias al concepto del teorema de límite central detallado a continuación.

3.4.1.1.1 Teorema de Límite Central

El teorema supone que la distribución de los datos de la población, cuya media de la población (μ), y la desviación estándar de la población (σ) poseen las siguientes propiedades para una muestra de tamaño n :

- Media de la distribución muestral (\bar{x}) es idéntica a la media de la población (μ)

$$\bar{x} = \mu$$

- La desviación estándar de la distribución de las medias muestrales es igual a

$$s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Esta cantidad recibe el nombre de error estándar de la media (s)

- Si se cumple que n es suficientemente grande, la forma de la distribución muestral es muy cercana a una distribución normal.

Por intuición, se espera que las medias de todas las muestras se acumularán alrededor de la media poblacional. A pesar de que el error estándar (s) de la distribución muestral se

relaciona con la desviación estándar de la población (σ), existe menor variabilidad entre las medias muestrales que en las observaciones individuales (Pagano & Gauvreau, 2001).

Cuando se realizan pruebas estadísticas, lo que se desea comprobar es que la media muestral (\bar{x}) es estadísticamente igual a la media de la población (μ) con un nivel aceptable de confianza (α). Para entenderlo de mejor manera, a continuación se presenta la prueba de hipótesis estadística.

3.4.1.1.2 Prueba de hipótesis estadística

La prueba de hipótesis estadística comienza por afirmar que la media de la población es igual a un valor dado como μ_0 , el cual fue obtenido de una muestra de la población. Esta declaración sobre el valor de un parámetro de la población se denomina *hipótesis nula* (H_0). Por otra parte, se tiene la *hipótesis alterna* (H_A), la cual es la segunda afirmación que contradice a H_0 , es decir que:

$$H_0: \mu_0 = \mu$$

$$H_A: \mu_0 \neq \mu$$

Según la evidencia que presente el estudio estadístico, se procede a aceptar o rechazar la hipótesis nula. Sin embargo, existe una posibilidad de cometer errores en estas afirmaciones, como de aceptar la hipótesis nula cuando es falsa, o de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera, los cuales arrojan resultados de falsos positivos y falsos negativos que ocurren en las pruebas de diagnóstico (Pagano & Gauvreau, 2001).

Tabla 2. Error de tipo I y Error de tipo II

Resultado de la prueba	Población	
	$\mu_0 = \mu$	$\mu_0 \neq \mu$
Se rechaza H_0	Incorrecto (Error de tipo I, o error α)	Correcto
Se acepta H_0	Correcto	Incorrecto (Error de tipo II, o error β)

Fuente: Pagano, M. & Gauvreau, K. (2001).

La probabilidad de tener una media tan extrema o más extrema que la muestra observada en el supuesto de que la hipótesis nula sea verdadera, se denomina *valor p* de la prueba, o sencillamente *p*. El valor *p* con el nivel de significancia predeterminado α para decidir si la hipótesis nula debería ser rechazada. Así se tiene que:

Si $p > \alpha$, entonces se acepta H_0

Si $p \leq \alpha$, entonces se rechaza H_0

3.4.1.1.3 Eficiencia

Se denomina eficiencia de la prueba de hipótesis a posibilidad de que un estudio particular detecte una desviación de la hipótesis nula en el supuesto de que exista. Es decir, si β es la posibilidad de cometer un error tipo II, y aceptar a la H_0 cuando esta es falsa, $1 - \beta$ es la eficiencia de la prueba de hipótesis. Igual que β , la eficiencia debe calcularse para una media de población alterna particular μ_1 (Pagano & Gauvreau, 2001).

Sin importar la decisión, siempre existe la posibilidad de cometer un error. Para disminuir los valores de α y β simultáneamente, se debe reducir el grado de superposición entre las distribuciones normales que se comparan en el estudio, la una centrada en μ_0 y la otra en μ_1 . Mientras más se separen los valores de μ_0 y μ_1 , mayor es la eficiencia de la prueba. Una alternativa es aumentar el tamaño de la muestra n . Si se incrementa n , el error estándar σ/\sqrt{n} disminuye, esto provoca que las dos distribuciones de muestreo se tornen más estrechas, reduciendo el grado de superposición (Pagano & Gauvreau, 2001). Por este motivo es importante la estimación del tamaño de la muestra explicado a continuación.

3.4.1.1.4 Tamaño de la muestra

Con lo anteriormente detallado, se puede estimar el tamaño de muestra necesario para conseguir una eficiencia de $1 - \beta$ cuando se lleva a cabo una prueba unilateral en el nivel α . Son varios los factores que influyen en el tamaño de la muestra, como el error α de tipo I. Si se reduce este valor de α , el punto de separación para rechazar H_0 incrementa su valor. De igual forma, si se reduce el error de tipo β , o si se incrementa la eficiencia, entonces $-z_\beta$ se reduce y se torna más negativo, lo que causa un valor de n mayor. Finalmente, mientras mayor sea la variabilidad de la población estudiada σ , mayor será el tamaño de la muestra

que se requiere (Pagano & Gauvreau, 2001). Es así como se presenta el cálculo del tamaño de la muestra siguiente

$$n = \left[\frac{(z_{\alpha} + z_{\beta})(\sigma)}{(\mu_1 - \mu_0)} \right]^2$$

Donde, n es el tamaño de la muestra

z es el estadístico de prueba

α es el error de tipo I

β es el error de tipo II

σ es desviación estándar de la población en estudio

μ_0 es valor de la media para la distribución de la población

μ_1 es valor de la media para la distribución de la población muestral

3.4.1.2 Tipos de muestreo

Después de determinar el número de individuos que va a tener la muestra, es necesario saber qué procedimiento se va a seguir para obtener a estos individuos. Este procedimiento puede determinar si la muestra escogida es representativa a la población, o caso contrario, presenta un sesgo a la población por lo que no serían válidos los resultados obtenidos para realizar una inferencia estadística. A continuación se detallan los tipos de muestreo más utilizados.

3.4.1.2.1 Muestreo aleatorio simple

Es el tipo de muestra más elemental, las unidades se eligen independientemente una a la vez hasta que se consigue el tamaño deseado de la muestra. Puesto que sólo es posible elegir a la vez una sola unidad, esta estrategia tiene la característica de ser un muestreo sin reemplazo. Cada unidad de estudio en la población tiene la misma probabilidad de ser incluida en la muestra por vez, y de esta forma, reducir la posibilidad de un sesgo.

3.4.1.2.2 Muestreo sistemático

El muestreo sistemático requiere la elección de una unidad mediante un sistema que no tenga que ver con el objetivo del estudio. Se logra la distribución de la muestra uniformemente a lo largo de la población, simple y cuando la presentación de los datos de

la población también sea aleatoria. Un ejemplo sería, si se desea estudiar el índice de masa corporal de jugadores de fútbol adultos en la provincia de Pichincha, se puede escoger como muestra a todos los individuos cuyo número de cédula termina en 5.

3.4.1.2.3 Muestreo estratificado

Este método divide a la población en distintos subgrupos, o estratos, y de éstos se realiza aleatorización simple para obtener la muestra de estudio. El inconveniente es que no todos los individuos de la población total tienen la misma probabilidad de ser escogidos, ya que aumenta la probabilidad en estratos pequeños. Por ejemplo, para el estudio de masa corporal de jugadores de fútbol adultos en la provincia de Pichincha, se divide a la población en los subgrupos de hombres y mujeres, y de estos grupos se realiza un muestreo aleatorizado simple.

3.4.1.2.4 Muestreo de grupo

Se utiliza cuando las unidades de estudio forman grupos naturales. El muestreo de grupo implica la selección de una muestra aleatoria de los grupos y la observación de todas las unidades de estudio entre los grupos elegidos. Para el ejemplo del estudio de masa corporal de jugadores de fútbol adultos en la provincia de Pichincha, se puede primero aleatorizar y escoger una muestra de ligas de fútbol, y de ahí escoger la muestra de los individuos.

3.4.1.2.5 Muestreo no probabilístico

Las estrategias de muestreo anteriormente descritas dan como resultado muestras probabilísticas, ya que se conoce la probabilidad de cada individuo en ser incluido dentro de la muestra, lo que permite hacer inferencias confiables y válidas. Sin embargo, existen casos en que no se puede conocer la probabilidad de elección que tienen los individuos de estudio sobre la población. Tal es el caso de experimentos que se realizan con personas voluntarias en los cuales el investigador no controla la probabilidad de elección de cada individuo.

En general, la elección de una estrategia de muestreo depende de varios factores, como son los objetivos del estudio, los recursos disponibles, el diseño experimental escogido, etc. En

la práctica, los investigadores combinan dos o más estrategias diferentes para la experimentación.

3.4.2 Realización del experimento

Una vez que se cuenta con toda la información anteriormente mencionada, se debe organizar y ejecutar a detalle el trabajo experimental, en base al diseño seleccionado. Se debe tener en cuenta todos los recursos que se deben utilizar, como equipos, personal, tiempo, etc. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

3.4.3 Análisis del experimento

En esta etapa se debe analizar al detalle lo sucedido en el experimento, sin perder de vista que estos resultados son observaciones de una muestra. Por este motivo, el análisis se debe realizar mediante métodos estadísticos que permitan definir si las diferencias encontradas en la muestra son lo suficientemente altas para garantizar esta diferencia en la población. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

3.4.4 Interpretación del diseño experimental

Con los resultados obtenidos del análisis estadístico formal, se puede aceptar o rechazar hipótesis iniciales, generar nuevas observaciones y conjeturas, verificar supuestos y elegir el mejor tratamiento. Incluso se puede unir información para generar nuevos aprendizajes u entendimientos del proceso mediante gráficos, ecuaciones, etc. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

3.4.5 Control y conclusiones finales

Es importante definir, implementar y dar seguimiento a los controles y medidas que puedan garantizar la mejora del proceso con la información que generó el experimento, ya que de otro modo, no habrá tenido mayor efecto la realización del estudio. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

3.5 Bloqueo y aleatorización

Existen herramientas utilizadas en el diseño experimental que tiene como objetivo el aumentar la precisión y asegurar la validez del resultado. Para reducir el error se usa el bloqueo, o agrupamiento de bloques, aleatorización o nulificación de algunos factores. Un bloque es una porción del material experimental que se espera sea más homogéneo que el total. El orden de aplicar los tratamientos dentro de cada bloque debe estar totalmente aleatorizado (Kenett & Zacks, 2000).

Se debe hacer énfasis al momento de planificar el experimento al análisis de todos los aspectos que pueden influir en el resultado, así como las fuentes de variación, factores que a pesar de que no sea interesante estudiar, se debe saber su influencia sobre la variabilidad de la respuesta (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Existen algunas maneras de controlar el efecto de estos factores, detallado a continuación:

3.5.1 Estudiar o bloquear el experimento

Se asignan varios niveles al factor de bloque y en cada nivel se prueba todos o algunos niveles del tratamiento en orden aleatorio. Los diseños factoriales pueden correrse en bloques. También se puede considerar al factor de bloque como factor de estudio, y a pesar de que se puede obtener muy buena información con esta opción, pocas veces es económicamente factible.

3.5.2 Nulificar el efecto

Se logra mediante la fijación del valor usual de este factor durante todas las corridas experimentales para que no tenga efecto sobre la variabilidad de la respuesta. El mantener fijo el valor implica que se debe hacer seguimiento a lo largo de todo el experimento para comprobar que realmente es fijo este valor. El inconveniente de esta técnica es que el experimento valdría únicamente para las condiciones del valor utilizado para dicho factor.

3.5.3 Aleatorización

Contrarresta especialmente el posible efecto que los factores no controlables como los ambientales pueden dar sobre la variable. En principio, la aleatorización permite que el efecto de estos factores se reparta equitativamente sobre todos los tratamientos. En este caso, no es posible medir el efecto que tienen los factores sobre la variable de respuesta, por lo que se utiliza únicamente cuando es muy costoso mantener fijo o controlar por niveles al factor.

3.6 Clasificación y selección de diseños experimentales

De las etapas anteriormente detalladas, la etapa a la que se debe dar un mayor énfasis es a la etapa de planificación. Si la problemática es correctamente estudiada, analizada y entendida, se puede escoger correctamente el diseño experimental y obtener resultados que realmente agregue valor al proceso y elimine, o controle la problemática inicial sin desperdiciar esfuerzos. Las características que más influyen al momento de escoger un diseño experimental según Gutiérrez y De la Vara (2008) son:

- El objetivo del experimento
- El número de factores a estudiar
- El número de niveles que se prueba en cada factor
- Los efectos que interesa investigar
- El costo, tiempo y precisión deseada en el experimento.

De estas características mencionadas, el objetivo del experimento brinda una clasificación de los diseños experimentales, mientras que las otras cuatro características dan una subclasificación. Para lograr escoger el diseño experimental adecuado frente a la problemática de estudio, se debe primeramente conocer la clasificación de los diseños experimentales de acuerdo a su objetivo y alcance, los cuales se detallan en la Figura 5.

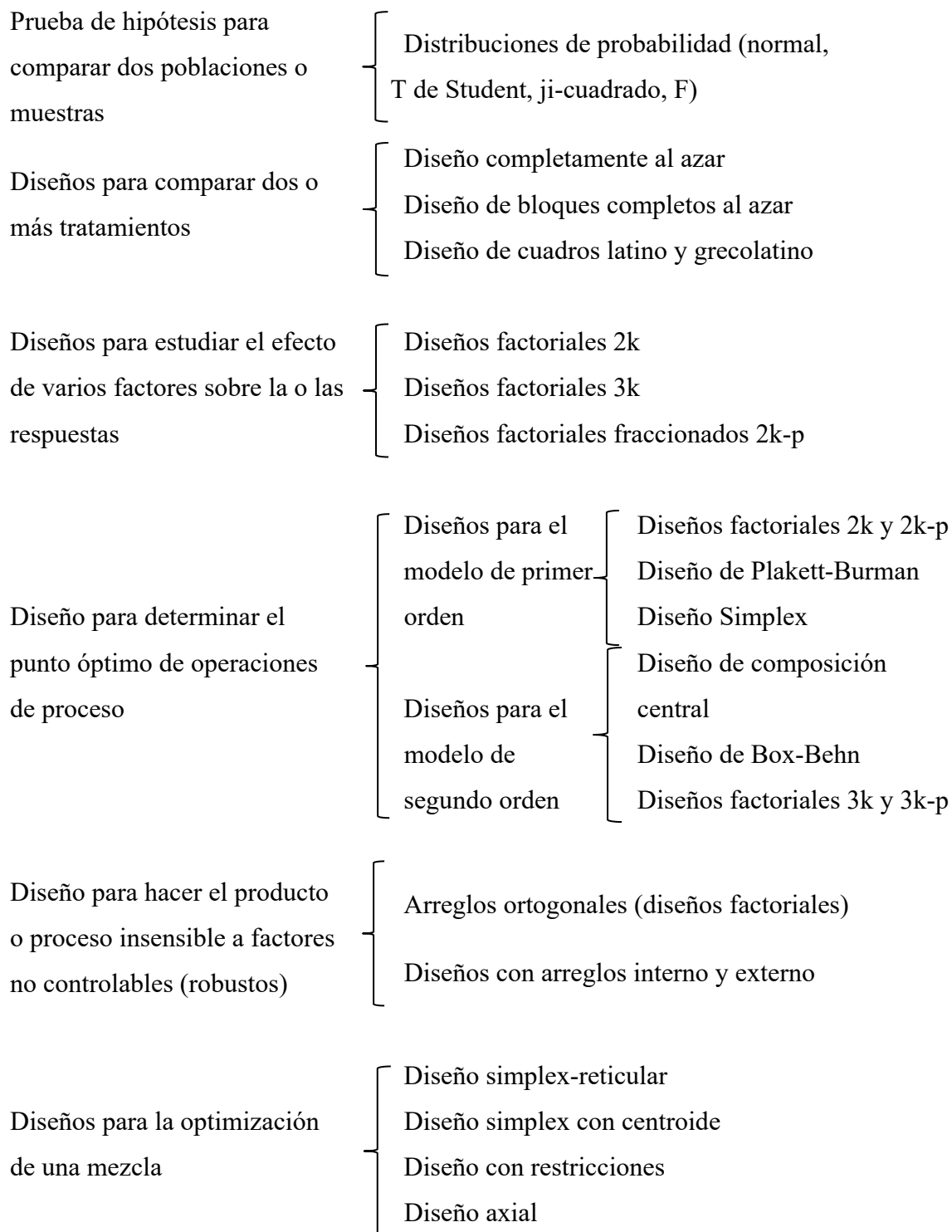


Figura 5. Clasificación de los diseños experimentales

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

En los procesos industriales, la mayor cantidad de experimentos que se realizan son bajo el objetivo de comparar dos o más tratamientos, estudiar el efecto de varios factores sobre la o las respuestas y determinar el punto óptimo de operaciones de proceso. Por este motivo, a continuación se revisa los diseños más utilizados.

3.6.1 Distribuciones de probabilidad

Las distribuciones de probabilidad nos ayudan a describir eventos que aún no suceden, pero posiblemente pueden suceder, presentan toda una gama de valores que pueden ocurrir a base de la experimentación, y es similar a una distribución de frecuencias. Una vez que se ha definido lo que ha pasado, se define qué tan probable es que se presente un evento futuro de acuerdo a la distribución de probabilidad.

La distribución de probabilidad relaciona a todos los posibles valores que puede tomar el individuo con la probabilidad asociada a cada uno de estos valores en la población representada a través de una tabla o una fórmula matemática. Las distribuciones de probabilidad que más se utilizan son: normal, T de Student, ji-cuadrado y F. La distribución normal está completamente definida por sus parámetros que son la media y la desviación estándar. Por otro lado, los parámetros que definen a las distribuciones T de Student, ji-cuadrado y F se llaman grados de libertad, los cuales tienen que ver con el tamaño de la muestra investigada. (Gutiérrez & De la Vara, 2008)

3.6.1.1 Distribución Normal

La distribución continua más común es la distribución normal, su curva es unimodal y simétrica con respecto a su media, es decir, el área bajo la curva derecha de la media es igual al área bajo la curva izquierda de la media, y ésta área sumada toma un valor de 1. Además la media, la moda y la mediana toman el mismo valor (Pagano & Gauvreau, 2001). La curva de distribución normal es asintótica, lo que quiere decir que la curva se acerca cada vez más al eje x, pero en realidad nunca llega a tocarlo, los extremos de la curva se extienden infinitamente en ambos sentidos (Manson, Lind & Marchal, 2003). Esta distribución se utiliza cuando se quiere hacer una inferencia estadística sobre las medias.

La distribución normal tiene un número infinito de posibles valores para la media y la desviación estándar, motivo por el cual, los análisis y tabulaciones se realizan bajo una misma curva normal ajustada llamada distribución normal estándar, en la cual la media toma un valor de cero y la desviación estándar toma un valor de uno ($\mu=0$ y $\sigma=1$). Los resultados de la variable aleatoria toman el valor de z . Todas las distribuciones normales se pueden convertir en una distribución normal estándar.

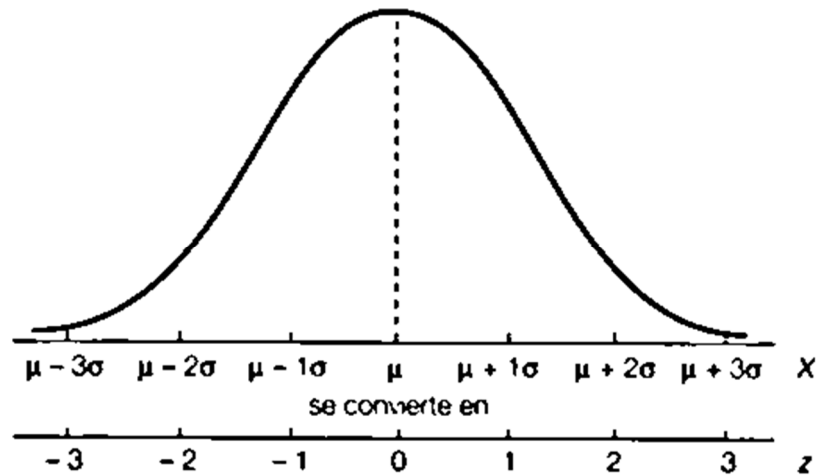


Figura 6. Distribución de probabilidad para la Curva Normal (x) convertida en Distribución Normal Estándar (z)

Fuente: Manson, Lind & Marchal (2003)

Para transformar el valor de un individuo u objeto x en una distribución normal al valor z de la distribución normal estandarizada, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Donde,

z = valor del individuo en la curva de distribución normal estandarizada

x = valor del individuo en la curva de distribución normal de la población x

μ = media en la curva de distribución normal de la población x

σ = desviación estándar en la curva de distribución normal de la población x

Otra característica muy importante de la distribución normal estandarizada es la repartición que presenta el área bajo la curva, representada en la Figura 7. Es así como se muestran tres áreas principales:

- Aproximadamente el 68% del área bajo la curva normal se encuentra dentro de una desviación estándar a la derecha y una desviación estándar hacia la izquierda ($\pm 1\sigma$).
- Aproximadamente el 98% del área bajo la curva normal se encuentra dentro de dos desviaciones estándar a la derecha y dos desviaciones estándar hacia la izquierda ($\pm 2\sigma$).
- Aproximadamente el 99,7% del área bajo la curva normal se encuentra dentro de tres desviaciones estándar a la derecha y tres desviaciones estándar hacia la izquierda ($\pm 3\sigma$).

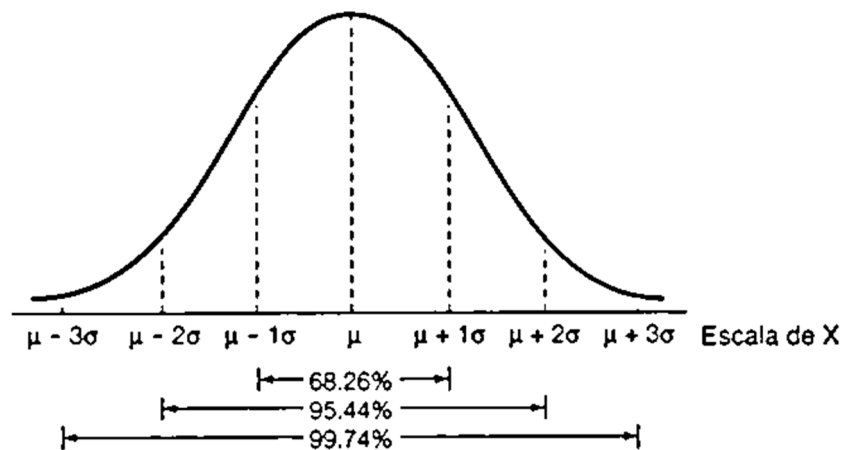


Figura 7. Área bajo la curva para la Distribución Normal Estándar

Fuente: Manson, Lind & Marchal (2003)

3.6.1.2 Distribución *t* de Student

Al realizar investigaciones, mucha veces no se conoce los parámetros de la población, en especial la media (μ) y la desviación estándar (σ). En este caso, se recurre a la distribución *t* de Student, y se basa en el supuesto de que la población de interés sigue una distribución normal (Manson, Lind & Marchal, 2003). Al igual que en la distribución normal estándar, la distribución *t* de Student es unimodal y simétrica respecto a su media 0, y el área bajo la curva es igual a 1. También, se utiliza cuando se quiere hacer una inferencia estadística sobre las medias. En la Figura 8 se muestra una comparación de la curva normal estandarizada y la curva *t* de Student.

Adicionalmente, la distribución t de Student tiene una característica llamada grados de libertad, abreviados como *gl*. Los grados de libertad miden la cantidad de información disponible en los datos, lo cual puede utilizarse para calcular la varianza de la población (σ^2), y así la desviación estándar de la población (σ). Los grados de libertad para la distribución t son $n-1$ debido a que se perdió 1 grado de libertad al estimar la media de muestreo \bar{x} . Para cada posible valor de grados de libertad, se tiene una curva de distribución t de Student diferente. Las distribuciones con menor cantidad de grados de libertad se encuentran más esparcidas, mientras más aumentan los grados de libertad, la distribución t se aproxima más a una distribución normal estándar. Esto se debe a que entre más grande es el tamaño de la muestra, la desviación estándar de la muestra (s), se convierte en un estimador más confiable de la desviación estándar de la población (σ). (Pagano & Gauvreau, 2001).

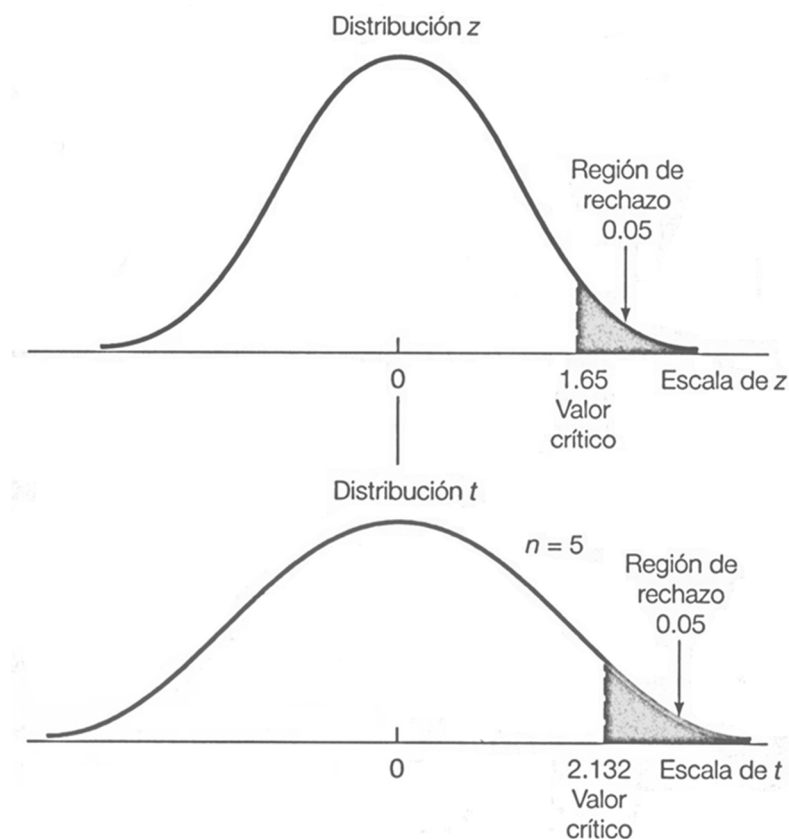


Figura 8. Distribución Normal Estandarizada en comparación a la curva t de Student, y sus regiones de rechazo con un nivel de significancia de 0.05 y prueba de una cola.

Fuente: Manson, Lind & Marchal (2003)

El valor t de Student se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$t = \frac{X - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Donde,

t = valor del estadístico para la distribución t de Student

x = media de la muestra.

μ = media de la población

s = desviación estándar de la muestra

n = tamaño de la muestra

Debido a que existe una curva de distribución t de Student para cada valor de grados de libertad diferente, normalmente se trabaja con programas de cómputo que arrojan los valores del área bajo la curva para el intervalo de confianza (α) seleccionado para esa distribución. En el caso de no contar con esta herramienta, se puede obtener los valores de tablas que cuentan con el resultado del cálculo del área bajo la curva para los intervalos de confianza más utilizados (α), por ejemplo: 10.0, 5.0, 1.0 y 0.5%.

3.6.1.3 Distribución ji-cuadrado

La distribución ji-cuadrado es una distribución asimétrica, cargada hacia la derecha, con valores de 0 al infinito, por lo que no toma valores negativos. Las curvas de distribución ji-cuadrado con menos grados de libertad son más simétricas. (Pagano & Gauvreau, 2001). La distribución ji-cuadrado se utiliza cuando se quiere hacer una inferencia estadística sobre las varianzas. Es importante resaltar que existe un interés en sí por la comparación de las varianzas independientemente de las medias, debido a que esta comparación determina a cualquier proceso o tratamiento. En general se considera que con una menor varianza, existe un mejoramiento potencial en la calidad del proceso o tratamiento. (Gutiérrez & De la Vara, 2008)

Esta distribución coincide con las distribuciones anteriores, normal estandarizada y T de Student, que el área bajo la curva es igual a 1. Además, comparte una característica con la distribución T, y es que existe una curva diferente para cada posible valor de grados de libertad. Para la distribución ji-cuadrado, los grados de libertad se expresan como $k - 1$,

donde k es el número de categorías, o como $n_1 + n_2 - 2$, donde n_1 y n_2 es el tamaño de la muestra de las poblaciones en estudio. (Pagano & Gauvreau, 2001).

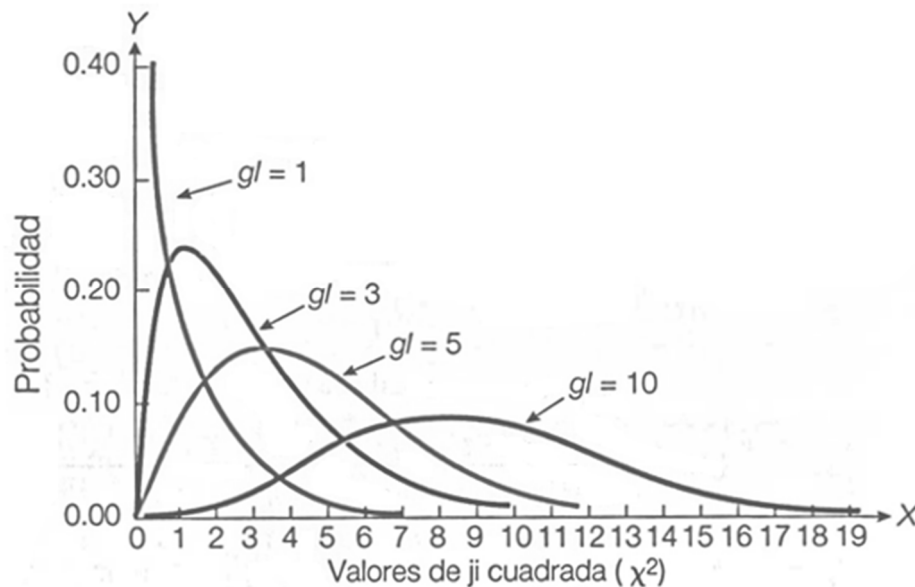


Figura 9. Distribución de probabilidad para la curva Ji-cuadrado

Fuente: Manson, Lind & Marchal (2003)

El valor ji-cuadrado X^2 se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$X^2 = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e}$$

Donde,

X^2 = valor del estadístico para la distribución X^2

f_o = valor de frecuencia observada en una categoría específica

f_e = valor de frecuencia esperada en una categoría determinada

3.6.1.4 Distribución F

La distribución F se utiliza cuando se quiere hacer comparación entre varianzas de dos muestras diferentes, por lo que es útil cuando se desea saber si la muestra de una población tiene más variación que la otra, donde se asume que la población sigue una distribución normal. También se usa la distribución F cuando se quiere comparar varias medias poblacionales., a la cual se denomina ANOVA, que será detallada más adelante. La distribución F también varía dependiendo de los grados de libertad que tenga, con la

característica que existen grados de libertad para el numerador ($n_{\text{muestra1}} - 1$) y otros grados de libertad para el denominador ($n_{\text{muestra2}} - 1$), lo cual se muestra en la Figura 10. Para reducir el tamaño de la tabla de valores críticos, la varianza muestral más grande se coloca en el numerador, por lo que el valor de la razón F siempre será mayor a 1,00.

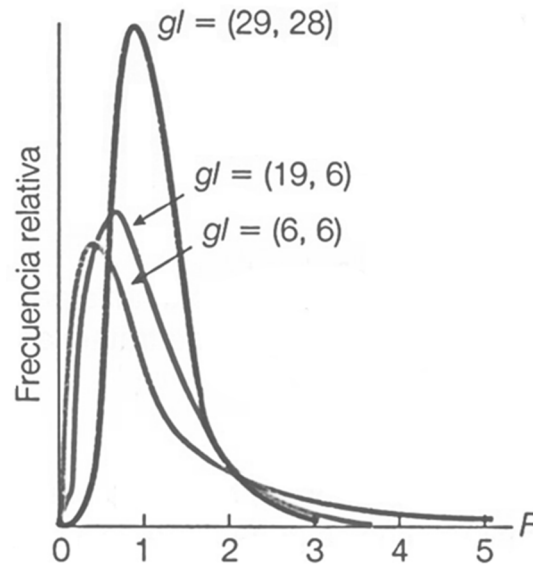


Figura 10. Distribución de probabilidad para la curva F

Fuente: Manson, Lind & Marchal (2003)

El valor F se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

Donde,

F = valor del estadístico para la distribución F

s_1 = desviación estándar al cuadrado (varianza) de la muestra 1

s_2 = desviación estándar al cuadrado (varianza) de la muestra 2

Otro uso de la distribución F comprende la técnica de análisis de varianza (ANOVA), la cual compara tres o más medias muestrales y determina si pertenecen a poblaciones iguales. Para hacer su uso de esta técnica se debe considerar que las poblaciones están distribuidas normalmente, tienen desviaciones estándar iguales y las muestras se seleccionaron de manera independiente. (Manson, Lind & Marchal, 2003).

3.6.2 Análisis de Varianza (ANOVA)

La técnica central que se ocupa para estimar si existe diferencia significativa o no entre los datos experimentales se llama Análisis de Varianza (ANOVA). La prueba de ANOVA determina si las medias de las muestras provienen de una o varias poblaciones con medias iguales, y en realidad se compara a estas muestras por medio de sus varianzas (o de sus desviaciones estándar). A continuación se detallan los tipos de variación que pueden causar diferencia (Mason, Lind & Marchal, 2003) en el proceso de experimentación:

- Variación total: es la variación global, incluye toda variación.
- Variación de tratamiento: es la variación que se atribuye al o los tratamientos aplicados en el proceso de experimentación.
- Variación aleatoria: es la variación que se atribuye a factores externos.

Como se detalló anteriormente, el análisis ANOVA utiliza el valor estadístico de la distribución F, el cual se estima mediante una razón, que para este caso calcula la variación poblacional mediante la siguiente ecuación:

$$F = \frac{\text{Valor de varianza poblacional basado en diferencias entre medias muestrales}}{\text{Valor de varianzza poblacional basada en diferencias dentro de las muestra}}$$

El numerador de esta expresión refleja la diferencia que existe entre tratamientos, mientras que el denominador mide la diferencia que existe por factores externos dentro de las muestras. Si el numerador es mayor al denominador, existe diferencia entre tratamientos, caso contrario la variación se atribuye a factores externos.

El procedimiento para realizar el análisis de varianza depende del Diseño Experimental que se ha escogido, pero el principio es el mismo. La técnica se basa en separar las variaciones con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento. Por ejemplo, en el caso de DCA, la fuente de variación son los tratamientos y el error aleatorio, por lo que, cuando la variación producida por los tratamientos es mayor que la variación producida por el error aleatorio, significa que existe una diferencia entre los tratamientos, lo cual produce un rechazo a la hipótesis nula. Caso contrario, se acepta la hipótesis nula si la variación producida por el error aleatorio es mayor que la variación producida por los

tratamientos. En este ejemplo, la hipótesis nula refiere a la igualdad de la media de los tratamientos evaluados en el DCA.

El ANOVA es muy útil para saber si existe diferencia entre tratamientos, sin embargo, en el caso de que se rechace la hipótesis nula, esta técnica no arroja el resultado de cuál es el o los tratamientos diferentes. Para este efecto, se tiene varios métodos de comparación de rangos múltiples como diferencia mínima significativa, método de Tukey, método de Duncan, método de Dunnet, etc. A continuación se explican los métodos utilizados con mayor frecuencia en la industria.

3.6.2.1 *Método de diferencia mínima significativa (LSD)*

La técnica que utiliza el método de diferencia mínima significativa es calcular el valor mínimo que debe existir entre dos medias muestrales para considerar evidencia de una diferencia significativa entre aquellos tratamientos. En conclusión, si el valor absoluto de la diferencia de las medias muestrales de los tratamientos es mayor al valor calculado por LSD, se considera que esta diferencia es significativa. El método LSD tiene una potencia importante, por lo que declara diferencias a pesar de ser pequeñas. (Gutiérrez & De la Vara, 2008). La diferencia mínima significativa se utiliza para comparar dos medias adyacentes de forma simple, lo cual ha sido planificado en el experimento. No debe utilizarse para comparar todos los posibles de medias, pues no toma en cuenta la tasa de error para el conjunto de comparaciones. (Sánchez, 2009)

El valor de la diferencia mínima significativa se obtiene mediante la fórmula:

$$LSD = t_{\alpha,2,g} \sqrt{CM_e \left(\frac{2}{n}\right)}$$

Donde,

$t_{\alpha,2,g}$ es el valor tomado de la tabla de distribución t de student al nivel de significancia α tomado por el experimentador, a 2 colas y con g grados de libertad

CM_e es el cuadrado medio del error experimental

n es tamaño (igual) de las muestras de cada tratamiento

3.6.2.2 Método de Tukey

El método de Tukey es una técnica más conservadora, ya que compara pares de medias de los tratamientos con un valor crítico que considera un error α muy cercano al declarado por el experimentador. La prueba de Tukey es menos potente que la prueba de LSD. Por lo tanto, el riesgo de detectar una diferencia significativa entre tratamientos donde no exista esta diferencia es menor con el método de Tukey. (Gutiérrez & De la Vara, 2008). A la prueba de Tukey se la conoce como prueba honesta de significación, y es utilizada cuando el experimentador requiere comparar más de dos medias de tratamientos. (Sánchez, 2009)

El valor de Tukey se obtiene mediante la fórmula:

$$T = Q_{\alpha,p,g}(S)$$

Donde,

$Q_{\alpha,p,g}$ es el valor tomado de la tabla Rango Estudentizado al nivel de significancia α tomado por el experimentador, el número p de tratamientos y con g grados de libertad.

S es el error estándar

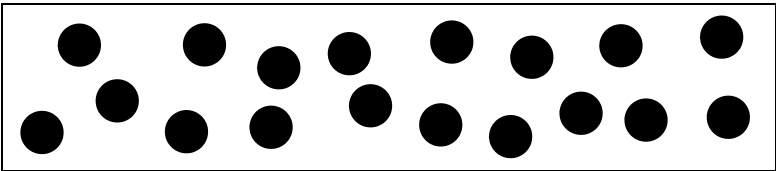
3.6.3 Diseños completamente al azar (DCA)




El diseño completamente al azar compara más de dos tratamientos con el efecto de un solo factor. La hipótesis fundamental es comprobar si los tratamientos son iguales estadísticamente entre sí, dado que solo considera dos fuentes de variabilidad que son los tratamientos y el error aleatorio (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Se aumenta la precisión si se realiza las comparaciones dentro de pares homogéneos del material experimental, y la aleatorización es más fácil de realizar lo que asegura la validez del experimento (Box, Hunter & Hunter, 2008). Como su nombre indica, en el diseño *completamente al azar* se debe realizar todas las corridas en un orden totalmente aleatorio, de tal manera que los efectos externos se reparten equitativamente en todos los tratamientos.

El Diseño completamente al azar es fácil de planificar y ensayar, en el caso de que se pierdan unidades experimentales, se puede realizar un DCA para muestras de diferente tamaño. Sin embargo, no es muy recomendable para experimentaciones de campo, más

bien para experimentaciones en laboratorio o invernadero ya que se emplean pocos tratamientos. (Sánchez, 2009)

Tabla 3. Arreglo de datos de un Diseño Completamente al Azar con 3 tratamientos.



Factor X	Tratamiento A	3 (Y_A) 
	Tratamiento B	1 (Y_B) 
	Tratamiento C	2 (Y_C) 

Donde,

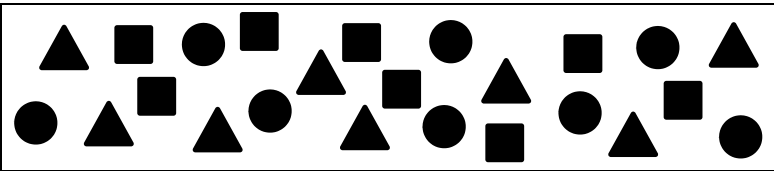
- 1,2 y 3 son las corridas experimentales
- Y es la medición correspondiente a la aplicación de cada tratamiento
- X es el factor de tratamiento
- A, B y C son los niveles del factor de tratamiento

3.6.4 Diseño de bloques completos al azar (DBCA)

El diseño de bloques completos al azar se utiliza cuando se quiere estudiar un factor principal, pero existen otros factores secundarios que influyen de manera considerable sobre este factor principal. Entonces, se combinan todos los tratamientos del factor principal con todas las variantes de los factores secundarios, y así eliminar de manera sistemática su efecto sobre las comparaciones estadísticas de los tratamientos (Montgomery, 2007). Este efecto recibe el nombre de bloqueo, y los factores secundarios reciben el nombre de factores de bloque, los cuales se incluyen en el estudio únicamente para realizar un adecuado y eficaz análisis del factor de interés, y no para estudiar su efecto directo en el experimento (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Los factores de bloqueo que aparecen frecuentemente en la práctica son turno, lote, día, y operador, debido a que no se pueden aleatorizar, por ejemplo, no se puede regresar el tiempo para aleatorizar el turno.

En el DBCA se consideran tres fuentes de variación, los cuales son el factor de tratamiento, el factor de bloque y el error aleatorio. El nombre de *bloques completos* significa que todos los tratamientos se prueban en cada bloque, por lo que se realiza de manera total y completa.

Tabla 4. Arreglo de datos de un Diseño de Bloques Completos al Azar con 3 bloques y 3 tratamientos



		Bloque i	Bloque j	Bloque k
Factor X	Tratamiento A	3 (Y_{Ai}) ■	4 (Y_{Aj}) ▲	9 (Y_{Ak}) ●
	Tratamiento B	7 (Y_{Bi}) ■	6 (Y_{Bj}) ▲	5 (Y_{Bk}) ●
	Tratamiento C	2 (Y_{Ci}) ■	8 (Y_{Cj}) ▲	1 (Y_{Ck}) ●

Donde,

los números del 1 al 9 son las corridas experimentales

Y es la medición correspondiente a cada tratamiento combinado con cada bloque

X es el factor de tratamiento

i, j y k son los niveles del factor bloque

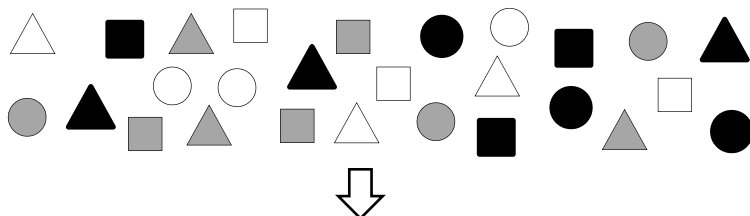
A, B y C son los niveles del factor de tratamiento










3.6.5 Diseño en cuadro latino (DCL)

En el diseño de cuadrado latino se estudian dos factores de bloque y un factor de tratamiento, motivo por el cual existen cuatro factores de variabilidad en el experimento, los cuales son el tratamiento, factor de bloque I, factor de bloque II y error aleatorio. El nombre de *cuadro* se debe a que existe la restricción de que todos los factores deben estudiarse en el mismo número de niveles, y *latino* porque se utilizan letras latinas para nombrar los tratamientos o niveles del factor de interés (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Una desventaja de los diseños cuadrados latinos pequeños es que proporcionan un número relativamente bajo para grados de libertad del error. Por este motivo, es deseable hacer réplicas de estos diseños para aumentar los grados de libertad del error (Montgomery, 2007).

Tabla 5. Arreglo de datos de un Diseño en Cuadro Latino con 3 tratamientos para cada factor



Factor de Tratamiento X		Factor de bloque F		
		Bloque i	Bloque j	Bloque k
Factor E	Bloque l	3 (YA _{El Fi}) 	4 (YC _{El Fj}) 	9 (YB _{El Fk}) 
	Bloque m	7 (YB _{Em Fi}) 	6 (YA _{Em Fj}) 	5 (YC _{Em Fk}) 
	Bloque n	2 (YC _{En Fi}) 	8 (YB _{En Fj}) 	1 (YA _{En Fk}) 

Donde,

los números del 1 al 9 son las corridas experimentales

Y es la medición correspondiente a cada tratamiento combinado con cada bloque

X es el factor de tratamiento

A, B y C son los niveles del factor de tratamiento

E y F 2 son los factores de bloque

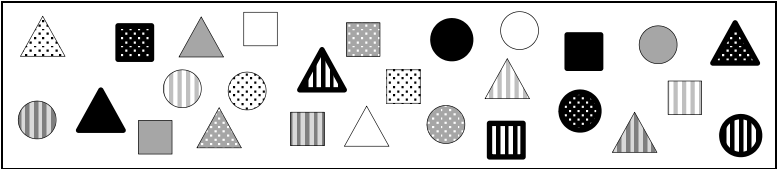
i, j, k, l, m y n son los niveles de los factores de bloque










3.6.6 Diseño de Cuadro Grecolatino (DCGL)

Con el diseño grecolatino se pueden controlar tres factores de bloque además del factor de tratamiento que se estudia. Su nombre de *cuadro* se debe a que todos los factores deben tener el mismo número de niveles, adicionalmente, se llama *grecolatino* porque se utiliza letras latinas para el nombramiento de los factores, y letras griegas para denotar los niveles del tercer factor (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Para el diseño de cuadrado grecolatino se debe asignar cada uno de los factores y niveles exactamente una vez en cada renglón y en cada columna. Además, el orden de ejecución de la prueba debe ser aleatorio. Este diseño se basa en la hipótesis de que no hay interacción entre los tratamientos y los factores de bloqueo (Kenett & Zacks, 2000).

Tabla 6. Arreglo de datos de un Diseño en Cuadro Grecolatino con 3 tratamientos cada factor



Factor de Tratamiento X		Factor de bloque F		
		Bloque i	Bloque j	Bloque k
Factor Bloque E	Bloque l	3 (YAδ _{El Fi}) 	4 (YCα _{El Fj}) 	9 (YBβ _{El Fk}) 
	Bloque m	7 (YBα _{Em Fi}) 	6 (YAβ _{Em Fj}) 	5 (YCδ _{Em Fk}) 
	Bloque n	2 (YCβ _{En Fi}) 	8 (YBδ _{En Fj}) 	1 (YAα _{En Fk}) 

Donde,

- los números del 1 al 9 son las corridas experimentales
- Y es la medición correspondiente a cada tratamiento combinado con cada bloque
- X es el factor de tratamiento
- A, B y C son los niveles del factor de tratamiento
- E, F y H 2 son los factores de bloque
- i, j, k, l, m y n son los niveles de los factores de bloque E y F
- α, β y δ son los 3 niveles del factor de bloque H

3.6.7 Diseño de Bloques Incompletos

Pueden existir diseños de bloques en los que no es posible correr todas las combinaciones de los tratamientos en cada bloque. Por lo general, estas situaciones se presentan por limitaciones de recursos, instalaciones, tamaño físico del bloque, etc. Para estos casos, se recomienda utilizar diseño de bloques incompletos balanceados (DBIB), en donde dos

tratamientos cualesquiera del diseño aparecen conjuntamente el mismo número de veces (Montgomery, 2007).

Por otro lado, en ocasiones no es viable realizar el experimento de forma balanceada a todos los tratamientos, ya que el número de bloques o el tamaño de cada bloque hacen que el número de corridas sea excesivamente grande. Para estos experimentos, se puede emplear un diseño parcialmente balanceado de bloques incompletos, en los que algunos pares de tratamientos aparecen un cierto número de veces, y otros pares de tratamientos aparece otro número de veces, y así, otros pares pueden aparecer otro número de veces. El par de tratamiento que aparece el mismo número de veces se le llama asociaciones, y el diseño puede ser nombrado de acuerdo a las clases de asociaciones que tiene. (Sánchez, 2009).

3.6.8 Diseño Factorial

El objetivo de los diseños factoriales es estudiar con el mismo interés el efecto que tienen varios factores sobre una o más variables de respuesta. Además, se permite combinar los diferentes niveles de los factores para obtener el tratamiento con el mejor desempeño. Los factores pueden ser cualitativos como tipo de máquina, presencia o ausencia de un material, etc., como también pueden ser cuantitativos como presión, temperatura, concentración, etc. Es importante seleccionar al menos dos niveles por factor. Finalmente se obtiene un arreglo factorial con varios tratamientos que se forma al combinar todos los niveles con todos los factores entre sí (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

En los experimentos factoriales, no se necesita tener la misma cantidad de niveles para todos los distintos factores. Algunos factores se pueden probar en 2 niveles, otros en 3 ó 4, etc. Se efectúan experimentos factoriales para estimar los efectos de las interacciones entre los diferentes niveles de los distintos factores (Kenett & Zacks, 2000).

Tabla 7. Arreglo de datos de un Diseño Factorial 2^2 con 2 factores y 2 niveles para cada factor

			Factor F			
			Nivel C		Nivel D	
			(+)	(-)	(+)	(-)
Factor E	Nivel A	(+)	11 ($Y_{A+,C+}$)	16 ($Y_{A+,C-}$)	8 ($Y_{A+,D+}$)	3 ($Y_{A+,D-}$)
		(-)	7 ($Y_{A-,C+}$)	1 ($Y_{A-,C-}$)	10 ($Y_{A-,D+}$)	13 ($Y_{A-,D-}$)
	Nivel B	(+)	14 ($Y_{B+,C+}$)	12 ($Y_{B+,C-}$)	2 ($Y_{B+,D+}$)	4 ($Y_{B+,D-}$)
		(-)	6 ($Y_{B-,C+}$)	5 ($Y_{B-,C-}$)	15 ($Y_{B-,D+}$)	9 ($Y_{B-,D-}$)

Donde,

Los números del 1 al 16 son las corridas experimentales

Y es la medición del tratamiento combinado cada nivel con cada factor

E y F son los factores de tratamiento

A, B, C y D son los niveles de los factores de tratamiento

(+) y (-) son los 2 niveles de cada uno de los factores de tratamiento

3.6.8.1 Diseño factorial completo nk

Los experimentos factoriales completos son aquellos en los que se efectúan pruebas completas en todas las combinaciones de los diversos factores en todos sus niveles. Por ejemplo, si se tiene 5 factores y cada uno de ellos se prueban en 3 niveles, en total se obtiene $3^5 = 243$ combinaciones de tratamiento, de las cuales se prueban todas (Kenett & Zacks, 2000). La notación que se le da a los diseños completos es n^k , donde k es el número de factores y n es el número de niveles por cada factor. Es decir, si se desea realizar un experimento donde se estudien 2 factores, y cada factor tiene 3 niveles, el diseño experimental se llamaría diseño factorial completo 3^2 . Además, el experimento factorial se puede duplicar, o repetir varias veces. Es aconsejable al menos realizar una repetición en el estudio. El orden en el que se efectúan las pruebas es totalmente aleatorio.

3.6.8.2 *Diseño factorial fraccionado $nk-p$*

Existen estudios donde se requiere analizar un amplio número de factores, y cada uno en varios niveles, por lo que resulta un número muy alto de corridas a realizar. Este hecho da como resultado un diseño experimental muy costoso. Para estos casos, se puede realizar diseños factoriales fraccionados, el cual permite reducir de manera importante el número de tratamientos experimentales con una pérdida mínima de información valiosa. La teoría de los diseños fraccionados se basa en una jerarquización de los efectos más importantes llamados efectos principales, seguidos por las interacciones dobles, luego las triples, cuádruples, etc. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Es importante aclarar que cuando se corre sólo una fracción del diseño factorial completo, suceden dos hechos inevitables:

- Se pierde información, ya que hay efectos que no se podrán estimar y se tienen menos grados de libertad disponibles para el error. Se espera que los efectos que no se estiman sean de alto orden, los que permite ignorarlos con bajo riesgo.
- Los efectos que sí se pueden estimar tienen al menos un alias. El que un efecto sea alias de otro, significa que en realidad estudian el mismo efecto, solo que con distinto nombre. Al estimar el efecto de uno, automáticamente se logra estimar al otro. Cuando el experimentador elige una fracción en la que dos efectos potencialmente importantes son alias, debe contar de antemano con una estrategia de interpretación del efecto estimado.

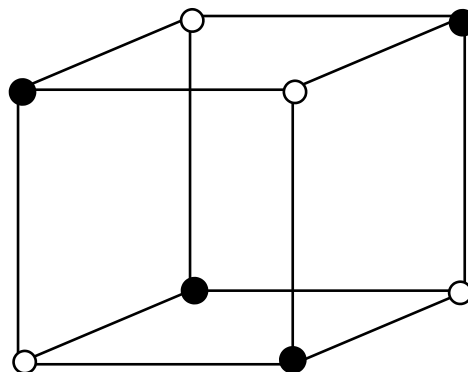


Figura 11. Representación de diseños factoriales fraccionados 2^{3-1}

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

Al realizar un diseño factorial fraccionado, los efectos no se pueden estimar de manera aislada, sino que se estiman las sumas (o restas) de los efectos alias. La interpretación de los efectos alias resulta de asumir que el efecto sumado de todos los alias no es importante, excepto por uno, que es el efecto de primer orden. Esto se logra con diseños factoriales de alta resolución, lo cual indica que tan bien pueden estudiarse los efectos potencialmente importantes mediante tal diseño (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Las resoluciones de mayor interés son:

- *Diseño de resolución III:* los efectos principales no son alias entre ellos, pero existen efectos principales que son alias de alguna interacción doble. Es decir, ningún efecto principal se confunde con ningún otro efecto principal. Pero, los efectos principales sí se confunden con interacciones de dos factores y éstas, con otras interacciones de dos factores.

Por ejemplo, $I = ABC$ y $A = BC$

- *Diseño de resolución IV:* los efectos principales no son alias entre ellos, ni con interacciones dobles, pero algunas interacciones dobles están aliadas con otras interacciones dobles. Dicho de otro modo, las interacciones principales no se confunden entre efectos principales, ni con interacciones de dos factores. Pero las interacciones de dos factores sí se confunden entre ellas.

Por ejemplo, $I = ABCD$ y $AC = BD$

- *Diseño de resolución V:* los efectos principales y las interacciones dobles son alias de interacciones triples o de mayor orden, es decir, los efectos principales e interacciones dobles están limpiamente estimados. En otras palabras, los efectos principales no se confunden con factores principales, ni con interacciones de dos factores. Las interacciones dobles no se confunden entre ellas, pero sí se confunden con interacciones de tres factores.

Por ejemplo, $I = ABCDE$ y $AD = BCE$

Para construir un diseño factorial fraccionado con la más alta resolución posible se sigue los siguientes pasos:

- Listar el diseño factorial completo para $k-p$ factores, de esta forma se tienen las primera $k-p$ columnas de la fracción deseada.

Por ejemplo, para un diseño factorial fraccionado 2_{IV}^{4-1} se obtiene un diseño factorial completo 2^3 .

A	B	C	D = -ABC
-	-	-	
+	-	-	
-	+	-	
+	+	-	
-	-	+	
+	-	+	
-	+	+	
+	+	+	

Figura 12. Ejemplo 1 en construcción de un diseño factorial fraccionado 2_{IV}^{4-1}

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

- Obtener de manera adecuada a los p generadores iniciales. Estos generadores deben ser interacciones del más alto orden posible, de manera que todos sus productos también sean interacciones de alto orden.

Para el ejemplo, el generador de indica que $D = \pm ABC$

- Multiplicar las columnas que indican los generadores para obtener la columna de signos de los últimos p factores.

En el ejemplo,

A	B	C	D = -ABC
-	-	-	+
+	-	-	-
-	+	-	-
+	+	-	+
-	-	+	-
+	-	+	+
-	+	+	+
+	+	+	-

Figura 13. Ejemplo 2 en construcción de un diseño factorial fraccionado 2_{IV}^{4-1}

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

De los pasos detallados anteriormente, lo más complicado es obtener los mejores generadores de la fracción que se desea estudiar. Afortunadamente, existen tablas de diseños factoriales fraccionados que incluyen su estructura de alias, lo que permite al investigador elegir el diseño, y saber con anticipación cual serían los alias de los efectos potencialmente importantes. Esta selección también se puede realizar con software estadísticos.

Tabla 8. Diseños factoriales fraccionados de resolución IV, con máximo 64 corridas

Nº de factores	Diseño	Número de corridas	Alias de cada efecto	Grado de fracción	Generadores
4	2_{IV}^{4-1}	8	1	$\frac{1}{2}$	$D = \pm ABC$
5	2_V^{5-1}	16	1	$\frac{1}{2}$	$E = \pm ABCD$
6	2_{VI}^{6-1}	32	1	$\frac{1}{2}$	$F = \pm ABCDE$
6	2_{VI}^{4-2}	16	3	$\frac{1}{4}$	$E = \pm ABC; F = \pm BCD$
7	2_{VII}^{7-1}	64	1	$\frac{1}{2}$	$G = \pm ABCDEF$
7	2_{IV}^{7-2}	32	3	$\frac{1}{4}$	$F = \pm ABCD; G = \pm ABDE$
7	2_{IV}^{7-3}	16	7	$\frac{1}{8}$	$E = \pm ABC; F = \pm BCD; G = \pm ACD$
8	2_V^{8-2}	64	3	$\frac{1}{4}$	$G = \pm ABCD; H = \pm AB EF$
8	2_{IV}^{8-3}	32	7	$\frac{1}{8}$	$F = \pm ABC; G = \pm ABD; H = \pm BCDE$
8	2_{IV}^{8-4}	16	15	$\frac{1}{16}$	$E = \pm BCD; F = \pm ACD; G = \pm ABC; H = \pm ABD$
9	2_{IV}^{9-3}	64	7	$\frac{1}{8}$	$G = \pm ABCD; \pm H = \pm ACEF; J = \pm CDEF$
9	2_{IV}^{9-4}	32	15	$\frac{1}{16}$	$F = \pm BCDE; G = \pm ACDE; H = \pm ABDE; J = \pm ABCE$
10	2_{IV}^{10-4}	64	15	$\frac{1}{16}$	$G = \pm BCDF; H = \pm ACDF; J = \pm ABDE; K = \pm ABCE$
10	2_{IV}^{10-5}	32	21	$\frac{1}{32}$	$F = \pm ABCD; G = \pm ABCE; H = \pm ABDE; J = \pm ACDE; K = \pm BCDE$

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

3.6.8.3 *Diseño factorial incompleto*

En algunas ocasiones, existen limitaciones para realizar todas las combinaciones de los diseños factoriales, por lo que se recurre a realizar diseños factoriales incompletos. En general, estos diseños tienen la característica de que cada par de tratamientos aparecen juntos en un bloque el mismo número de veces. Las comparaciones entre pares de tratamientos se realizan frente a la variabilidad existente dentro de los bloques (Box, Hunter & Hunter, 2008).

3.6.9 **Diseño Robusto de Taguchi o Arreglos Ortogonales**

Los arreglos ortogonales, también conocidos como diseños de Taguchi o diseño robusto, reconocen que existen factores no controlables que causan variabilidad, conocidos como factores de ruido. El diseño de Taguchi intenta identificar los factores de control que logran minimizar el efecto de los factores de ruido sobre las variables de salida. Dicho de otra forma, el diseño robusto busca los parámetros de factores de control que logran un proceso o producto con desempeño adecuado insensibles a los factores de ruido. En el experimento, se manipulan los factores de ruido para obtener una configuración de los factores de control que sea resistente a la variación causada por los factores no controlables. (Minitab Inc, 2015) Taguchi reserva las interacciones entre los niveles de los factores, en su lugar prefiere saturar lo más posible los arreglos para optimizar recursos y analizar solo los efectos principales de cada factor. (Barajas, 2011)

Los resultados obtenidos de los diseños robustos son la estimación del efecto que tiene cada factor individual sobre la calidad del proceso o producto en diseño, y la conclusión de la mejor condición para elaborar dicho producto o proceso para que las características de calidad puedan ser sostenibles en el tiempo. Los diseños ortogonales son altamente utilizados en las industrias al momento de diseñar nuevos productos o procesos, ya que previene la falta de calidad y la utilización innecesaria de recursos por variabilidad de factores no controlables.

El nombre de arreglo ortogonal se debe a que es un diseño balanceado, es decir que los niveles de los factores se ponderan de forma equitativa, y la suma del producto de sus elementos es igual a cero. Por este motivo, cada factor se puede evaluar

independientemente de los demás factores, por lo que la estimación de un factor no afecta al siguiente. Este efecto reduce el tiempo y costo del experimento. (Minitab Inc, 2015)

Para demostrar que un diseño es ortogonal, se debe comprobar la independencia entre los factores. Con el objeto de brindar mayor detalle, se ejemplifica con un diseño factorial completo 2^3 , en donde existen tres factores (A, B, C), cada uno con dos niveles (1, -1) y un total de 8 corridas:

Tabla 9. Diseño Factorial Completo 2^3

Factor A	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
Factor B	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
Factor C	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1

Fuente: Minitab Inc. (2015)

Donde,

A, B y C son los factores de tratamiento

1 y -1 son los niveles de los factores de tratamiento

Entonces, al sumar el producto de los elementos por factor da como resultado cero, así:

$$A \times B = (1 \times 1) + (1 \times 1) + (1 \times -1) + (1 \times -1) + (-1 \times 1) + (-1 \times 1) + (-1 \times -1) + (-1 \times -1) = 4 - 4 = 0$$

$$A \times C = (1 \times 1) + (1 \times -1) + (1 \times 1) + (1 \times -1) + (-1 \times 1) + (-1 \times -1) + (-1 \times 1) + (-1 \times -1) = 4 - 4 = 0$$

$$B \times C = (1 \times 1) + (1 \times -1) + (-1 \times 1) + (-1 \times -1) + (1 \times 1) + (1 \times -1) + (-1 \times 1) + (-1 \times -1) = 4 - 4 = 0$$

De esta forma se estima que los factores A, B y C son independientes entre sí. En conclusión, un experimento es de diseño ortogonal si los efectos de los factores se equilibran con los efectos de los otros factores, de forma que la suma de sus productos es cero (Minitab Inc, 2015).

3.6.9.1 Factores de control

Anteriormente se mencionó que en la experimentación se estudia principalmente factores controlables, sin embargo, en los diseños ortogonales de Taguchi, se desea estudiar factores no controlables con el objeto de tener resultados robustos. Por lo general, los

factores de estudio son factores controlables, y en este tipo de estudios, es necesario clasificar más detalladamente los tipos de factores que influyen en el proceso, en cuanto a su efecto en la media y la variabilidad de la respuesta de interés (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Se distingue así cuatro tipo de factores:

- Afecta a la media y a la variabilidad (Factor clase I)
- Afecta sólo a la variabilidad (Factor clase II)
- Afecta sólo a la media (Factor clase III)
- No afecta a la media ni a la variabilidad (Factor clase IV)

Generalmente, cuando se estudia el efecto de un factor sobre la respuesta, se refiere al efecto que el factor tiene sobre la media de la respuesta. En el diseño robusto, se estudia el efecto del factor que tiene sobre la media y sobre la variabilidad de la respuesta al mismo tiempo.

3.6.9.2 *Factor de señal*

Alrededor existen varios productos que trabajan bajo diferentes niveles de desempeño, los cuales pueden ser escogidos de acuerdo al requerimiento del usuario o consumidor. A los diferentes niveles de desempeño se les conoce como factores de señal (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Por ejemplo, al ocupar una lavadora, se puede escoger el nivel de velocidad que se desea dependiendo de la calidad de ropa que se va a lavar.

3.6.9.3 *Factor de ruido*

Los factores no controlables, o factores de ruido que tienen un efecto sobre la variable de respuesta (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Estos se clasifican en tres tipos:

- *De ruido externo:* se refiere a factores que forman parte del ambiente y a la carga de trabajo en el cual se desarrolla el proceso de experimentación. Por ejemplo, el polvo, la temperatura del ambiente, humedad del ambiente, errores en la operación del equipo, etc.
- *De ruido interno:* se refiere a la variación generada en el proceso de unidad a unidad producida, y que se debe a su propia naturaleza o tecnología y la diversidad de sus componentes. Por ejemplo, diferencias de un producto de lote a lote a pesar de ser elaborado con la misma materia prima.

- *De deterioro:* se refiere a efectos que aparecen poco a poco con el tiempo por la degradación paulatina del proceso y sus componentes, los cuales pueden provocar fallas. Por ejemplo, desgaste de maquinaria por el mismo uso, cansancio del operador, etc.

3.6.9.4 Tipos de estudios de robustez

Los estudios de robustez se clasifican de acuerdo a criterios como el tipo de variable de respuesta, y la existencia o ausencia de factores de señal (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Las variables de respuesta pueden ser de los siguientes tipos:

- *Entre más pequeña mejor:* son variables o características de calidad cuya exigencia es que no excedan el valor máximo de aceptación, es decir, entre más pequeño sea dicho valor, es mejor. Por ejemplo, cantidad de sustancias tóxicas en un producto alimenticio.
- *Entre más grande mejor:* son variables o características de calidad cuya exigencia es que sean mayores que un valor mínimo de aceptación, es decir, entre más grande sea dicho valor, es mejor. Por ejemplo, cantidad de antioxidantes en un producto alimenticio funcional.
- *Lo nominal es lo mejor:* son variables o características de calidad cuya exigencia se mueven alrededor de un valor óptimo de aceptación, es decir, no pueden ser mayores ni menores a la especificación. Por ejemplo, el peso empaçado de producto alimenticio.

Cuando el estadístico es nominal, existen dos tipos. El tipo I refiere a respuesta no negativa, que van de cero a infinito. Se recomienda utilizar tipo I cuando la media y la desviación estándar tienen una relación lineal. Por otra parte, el tipo II refiere a respuestas que pueden tomar valores tanto negativos como positivos, y el cero puede ser el valor nominal. Se recomienda utilizar tipo II cuando la media y la desviación estándar son independientes.

- *Estático:* cuando no existe al menos un factor señal que el usuario pueda especificar de acuerdo a su necesidad de uso. Por ejemplo, una leche chocolatada empaçada.
- *Dinámico:* cuando existe al menos un factor señal que el usuario pueda especificar de acuerdo a su necesidad de uso. Por ejemplo, una leche

chocolatada en una máquina expendedora en donde se puede escoger el nivel de chocolate, o de azúcar que se desea.

A continuación se detallan los arreglos ortogonales más frecuentes. Es importante recalcar que Taguchi dispone las columnas de los arreglos ortogonales en un orden diferente que los diseños factoriales. La primera columna de cada arreglo ortogonal se encuentra lo más agrupada posible, de forma que los cambios de nivel de los siguientes factores se realizan un número mínimo de veces. Taguchi recomienda asignar a la primera columna el factor que sea más difícil manipular durante el experimento, y así realizar las corridas. No se realiza un énfasis en la aleatorización de las corridas como en el diseño clásico, sino adecuar la experimentación a la aplicación práctica y sus dificultades.

Tabla 10. Arreglo L₄ (fracción 2³⁻¹)

Arreglo L ₄ (fracción 2 ³⁻¹)			
Nº de corrida	Nº de columna		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1
2 factores: columnas 1 y 2			
3 factores: columnas 1, 2 y 3			

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

Tabla 11. Arreglo L₉ (fracción 3⁴⁻²)

Arreglo L ₉ (fracción 3 ⁴⁻²)				
Nº de corrida	Nº de columna			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1
2 factores: columnas 1 y 2				
3 factores: columnas 1, 2 y 3				
4 factores: columnas 1, 2, 3 y 4				

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

Tabla 12. Arreglo L_8 (fracción 2^{7-4})

Arreglo L_8 (fracción 2^{7-4})							
N° de corrida	N° de columna						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
2 factores: columnas 1 y 2							
3 factores: columnas 1, 2, y 4							
4 factores: columnas 1, 2, 4 y 7							
5 factores: columnas 1, 2, 4, 6 y 7							
6 factores: columnas 1, 2, 4, 5, 6 y 7							
7 factores: columnas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7							

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

Tabla 13. Arreglo L_{18} (fracción 3^{7-5})

Arreglo L_{18} (fracción 3^{7-5})								
Nº de corrida	Nº de columna							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1
Un factor con dos niveles se asignan a la columna 1								
Los factores con tres niveles se asignan a las columnas restantes: 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8								

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

Tabla 14. Arreglo L_{16} (fracción 2^{15-11})

Arreglo L_{16} (fracción 2^{15-11})															
Nº de corrida	Nº de columna														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1
4 factores: columnas 1, 2, 4, y 8															
5 factores: columnas 1, 2, 4, 8 y 15															
6 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 14 y 15															
7 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 13, 14 y 15															
8 factores: columnas 1, 2, 4, 8, 11, 13, 14 y 15															
9 factores: columnas 1, 2, 4, 7, 8, 11, 13, 14 y 15															
10 factores: columnas 1, 2, 4, 7, 8, 11, 12, 13, 14 y 15															
11 factores: columnas 1, 2, 4, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14 y 15															
12 factores: columnas 1, 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15															
13 factores: columnas 1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15															
14 factores: columnas 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15															
15 factores: columnas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15															

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

3.6.10 Diseño con arreglo interno y externo (diseño de parámetros)

Para lograr un diseño experimental de tipo robusto debe existir al menos un factor de ruido para el cual se desea que el proceso o producto sea insensible a su efecto, sin pretender controlar dicho factor de ruido. Para determinar las condiciones de operación robustas a uno o varios factores de ruido se establece el diseño con arreglo interno y externo. Primero se debe determinar los factores de control y los factores de ruido que se va a estudiar. Después se realiza dos arreglos ortogonales, uno para los factores de control y otro para los factores de ruido. Finalmente se deben sobreponer los dos arreglos ortogonales de forma que cada combinación de factores controlables (arreglo interno) se prueben en cada combinación de los factores de ruido (arreglo externo). (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

3.6.10.1 Razón señal/ruido

Para el diseño con arreglo interno y externo, existe un estadístico de desempeño que calcula cada combinación de los factores controlables llamado cociente o razón señal/ruido (S/R). Este coeficiente se analiza como cualquier variable de respuesta, entre más se maximice el estadístico razón señal/ruido, más robusta será la combinación. De acuerdo a la característica de calidad, el estadístico razón señal/ruido puede tener diferentes cálculos.

Tabla 15. Cálculo de estadístico de prueba señal/ruido (S/R)

Tipo de característica	Razón señal/ruido (S/R)
Mientras más pequeña es mejor	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 \right]$
Mientras más grande mejor	$-10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\gamma_i^2} \right]$
Su valor nominal es mejor (tipo I)	$10 \log \left[\frac{\gamma^2}{s^2} \right]$
Su valor nominal es mejor (tipo II)	$-10 \log (s^2)$
Proporción de defectuosos	$-10 \log \left[\frac{p}{(1-p)} \right]$

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

3.6.10.2 *Etapas del diseño con arreglo interno y externo*

Para realizar el análisis de datos del diseño con arreglo interno y externo se debe seguir los siguientes pasos:

- Determinar los factores controlables que tienen efecto sobre el estadístico razón señal/ruido. Con los efectos activos se determinan las condiciones de operación más robustas, las cuales son las que maximizan el valor de respuesta S/R.
- Analizar la media y los factores que afectan a la media, ya que estos serán los factores de ajuste que llevarán a la media a tener su valor objetivo. Si todos los factores que afectan a la media también afectan al estadístico S/R es necesario tener una solución de compromiso. Es decir, escoger el factor como factor de ajuste a aquel que más afecta a la media pero menos afecta a la variabilidad.
- Además de los pasos descritos anteriormente, Taguchi recomienda realizar nuevamente estos pasos con el estadístico general $-10 \log(s^2)$ para cualquier respuesta continua, a fin de obtener otra visión del análisis. Si los resultados de este segundo análisis difieren de los primeros resultados, se debe analizar detalladamente ambas soluciones para determinar cuál es la mejor, y proteger así al experimentador de obtener soluciones no tan óptimas.

3.6.11 **Metodología de Superficies de Respuesta (MSR)**

A los investigadores les interesa estudiar o explorar la naturaleza de las superficies de respuesta en ciertos dominios de interés, con el fin de pronosticar el rendimiento o los resultados futuros en un particular, para optimizar un proceso escogiendo los valores que maximicen el rendimiento, o que minimicen la pérdida esperada. (Box, Hunter & Hunter, 2008).

Después de realizar algunos experimentos, no se logra obtener la respuesta buscada, o a su vez, la mejora resultante no es suficiente, por lo que se debe seguir experimentando hasta encontrar el nivel buscado. Para estos casos, tal vez es necesario desplazarse de la región experimental, para lo cual se utiliza la Metodología de Superficies de Respuesta (MSR). La MSR permite encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso.

3.6.11.1 *Región experimental y región de operación*

La región experimental se refiere al espacio delimitado por los rangos de experimentación utilizados con los niveles de cada factor. Por otro lado, la región de operación está conformada por todo el conjunto de puntos o condiciones donde el proceso o producto es o puede ser operado. Estas regiones están explicadas en la Figura 14. La región de operación considera todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores donde el proceso puede operar, y por lo general es más grande que la región experimental.

Los valores óptimos que se desea encontrar después del estudio, pueden encontrarse en cualquier lugar de la región de operación, ya sea dentro o fuera de la región experimental. En procesos que han sido estudiados continuamente, es muy posible encontrar a los valores óptimos cercanos a las condiciones de operación usuales, sin embargo, en casos de nuevos estudios, es muy posible que el punto de interés se ubique fuera de la primera región experimental. El valor óptimo se refiere a la mejor combinación posible de todos los factores en la región de operación.

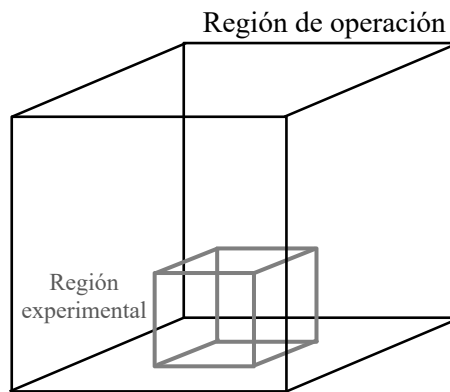


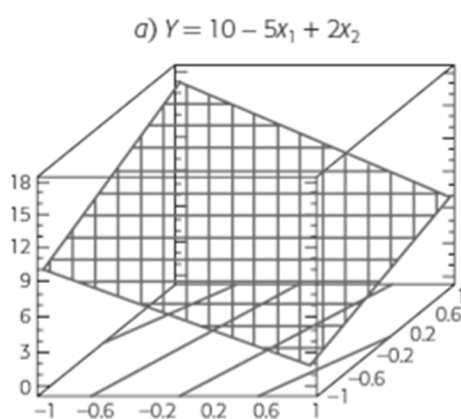
Figura 14. Representación gráfica de región de operación y región experimental

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

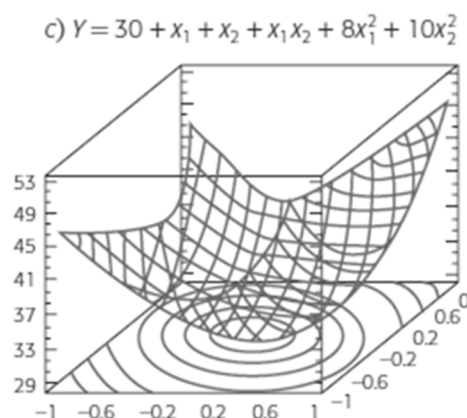
3.6.11.2 *Elementos de la Metodología de Superficies de Respuesta*

La metodología de superficies de respuesta implica tres aspectos: diseño, modelo y técnica de optimización. El diseño y el modelo se piensan al mismo tiempo, y dependen del tipo de comportamiento que tenga la respuesta, es decir, plano (primer orden) o curvo (segundo orden) como lo indica la Figura 15. El aspecto diseño implica ajustes mediante modelos de

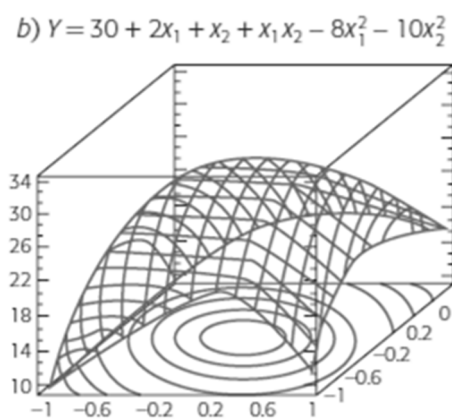
regresión lineal múltiple. El aspecto modelo, utiliza el análisis de regresión lineal múltiple junto con sus elementos básicos como parámetros del modelo, modelo ajustado, significancia del modelo, residuos, predichos, etc. Por último, el aspecto de optimización se forma con algunas técnicas matemáticas como derivadas de funciones, operaciones con matrices, sistemas de ecuaciones simultáneas, etc., cuyo objetivo es explorar a los modelos ajustados para obtener información sobre el punto óptimo.



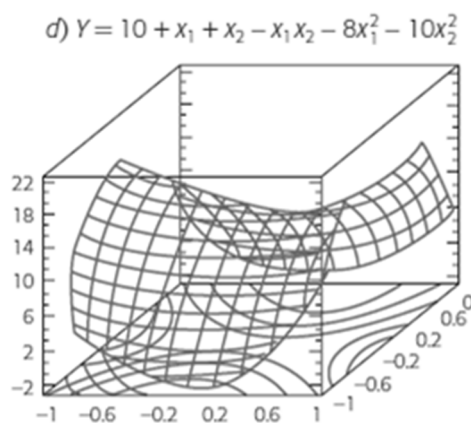
Modelo de primer orden



Modelo de segundo orden



Modelo de segundo orden



Modelo de segundo orden

Figura 15. Modelos de primer y segundo orden en la metodología de superficie de respuesta.

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

3.6.11.3 Etapas de la Metodología de Superficies de Respuesta

En general, se pueden distinguir tres etapas en la búsqueda del punto óptimo de una operación que son: cribado, búsqueda I y búsqueda II, detallado de forma general en la Figura 16. Sin embargo, se puede omitir alguna de estas etapas, o a su vez, repetirlas varias veces hasta encontrar el punto óptimo. A continuación se detallan estas tres etapas:

- *Cribado:* La optimización de un proceso inicia con esta etapa cuando existen muchos factores que influyen sobre la variable de interés. Esta etapa ayuda a eliminar factores que no son de tanto interés, y estudiar únicamente a los factores que tienen mayor influencia sobre la variable de respuesta.
- *Búsqueda I o de primer orden:* se aplica una vez que se tienen pocos factores de influencia sobre la variable de respuesta. En esta etapa se corre un diseño experimental, por lo general diseño factorial completo o fraccionado con repeticiones al centro, que permita detectar de forma preliminar el tipo de superficie de respuesta.
- *Búsqueda II o de segundo orden:* cuando en la etapa anterior se determina la presencia de una curvatura, se corre otro diseño experimental que permita caracterizar de mejor manera a la curvatura y modelar dicha superficie.

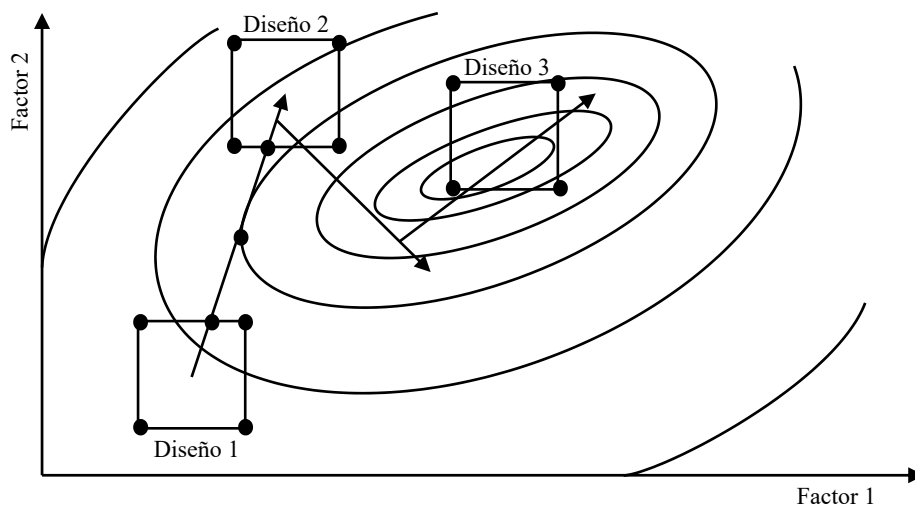


Figura 16. Visión gráfica de la metodología de superficie de respuesta.

Fuente: Gutiérrez & De la Vara (2008)

3.6.11.4 Técnicas de optimización

Una vez que se tiene un modelo ajustado y validado, se procede a explorar la superficie descrita por el modelo para encontrar la combinación de niveles en factores que dan por resultado un valor óptimo de la respuesta, o bien, para determinar la dirección óptima de movimiento en la que se debe experimentar en el futuro. La técnica de optimización se utiliza dependiendo del tipo de modelo ajustado, y existen básicamente tres métodos, que son:

- *Escalamiento ascendente (o descendente)*: se utiliza para modelos de primer orden. Cuando la variable de respuesta de interés es de tipo, mientras más grande es mejor, se tiene un escalamiento ascendente. Por otro lado, cuando la variable de respuesta de interés es de tipo, mientras más pequeño es mejor, se tiene un escalamiento descendente. La técnica de optimización de escalamiento se aplica cuando se cree estar lejos de la condición óptima, por lo que es necesario explorar primeramente la región experimental inicial.
- *Análisis canónico*: se utiliza para modelos de segundo orden, y se aplica cuando se quiere explorar la región experimental con más amplitud, o cuando se sospecha estar cerca del punto óptimo. Una vez que se ajusta el modelo de segundo orden, se puede encontrar las coordenadas del punto estacionario, el cual es un candidato para ser el punto óptimo. Posteriormente, se analiza el tipo de punto y la orientación de la superficie con el objeto de encontrar el punto óptimo. Si la superficie encontrada no es del tipo deseado, se debe realizar un análisis de cordillera.
- *Análisis de cordillera*: se utiliza para modelos de segundo orden. En algunas ocasiones, el punto estacionario no es del tipo que se requiere, por lo que la opción es encontrar el mejor punto posible dentro de la región experimental. Este punto se encuentra sobre la cordillera óptima, a partir del centro del diseño, y es aquel que predice la mejor respuesta sobre la región.

4. SITUACION ACTUAL

4.1 Descripción de la Organización

La organización en la que se realiza el estudio, es una empresa familiar con 12 años en funcionamiento, la cual se dedica a la producción y comercialización de productos conservas, salsas, jaleas y mermeladas. La oficina central y planta de producción está ubicada en el norte de Quito, ciudad capital de Ecuador. Los productos elaborados por esta empresa se distribuyen a nivel nacional, por lo que cuenta con tres Centros de Distribución: Quito, Guayaquil y Cuenca. Por motivos de confidencialidad, la empresa decide mantener anonimato en el presente estudio.

4.1.1 Filosofía de la organización

4.1.1.1 Misión

Existimos para elaborar productos alimenticios en conserva bajo altos estándares de calidad y excelencia en gestión, brindando satisfacción al consumidor y al medio ambiente.

4.1.1.2 Visión

Para el año 2017, triplicaremos las ventas del año 2012, seremos líderes en el mercado de conservas con la promesa de sana nutrición y buen sabor a nuestros consumidores.

4.1.1.3 Valores

Los valores con los que trabaja la compañía ante todas las relaciones que mantiene con sus consumidores, colaboradores, clientes, comunidades, proveedores y socios, aplica altos estándares éticos, los cuales se reflejan en cada actividad realizada. Los valores son:

- Honestidad: transparente en todo momento
- Responsabilidad: responder a los compromisos adquiridos
- Integridad: rectitud ante la palabra y acción

- Respeto: consideración y reconocimiento a todas las personas
- Pasión: compromiso con mente y corazón

En la empresa trabajan alrededor de 40 empleados, distribuidos en dos turnos. Según el Ministerio de Industrias y Productividad del Ecuador, la empresa está catalogada como una pequeña empresa, ya que alberga de 20 a 50 obreros. Cada día de trabajo se procesa entre 4 a 6 toneladas de los distintos productos, como resultado existe una producción mensual total de 100 toneladas aproximadamente.

Los productos ofertados están enfocados a dos grupos de clientes, los cuales son:

- Consumidor final, que se refiere a personas naturales. El producto se distribuye por medio de autoservicios, minoristas, y tiendas de barrio.
- Entidades comerciales, que se refiere a negocios, en su mayoría son panaderías. En este caso, el producto se entrega directamente a la procesadora del cliente.

4.1.2 Situación actual

Dentro de la proyección de ventas de la empresa, se estima un crecimiento del 8% anual, y un incremento en la participación de mercado de un 5%. A pesar de que el estudio de la proyección está basados en la estacionalidad de la demanda, las promociones y descuentos ofertados, y la reacción de la competencia, en el año 2014 el crecimiento en ventas fue del 6,53%, mientras que el incremento en participación de mercado fue del 8,14%. Se puede observar un incremento en la participación de mercado más alta de lo planificado, sin embargo el crecimiento de ventas no fue el esperado.

Frente a esta problemática, el directorio decide analizar las posibles causas en conjunto con diferentes departamentos, los cuales son: Ventas, Mercadeo, Planificación y Abastecimiento Interno. Dentro del área de abastecimiento interno, se encuentran las áreas de Aseguramiento de Calidad, Producción, Mejoramiento de procesos y Mantenimiento. El presente trabajo se enfoca en el análisis realizado con el área de Abastecimiento Interno.

4.1.2.1 Descripción del problema

El resumen de ventas por tipo de producto del año 2014 para esta empresa familiar se representa en la Figura 17.

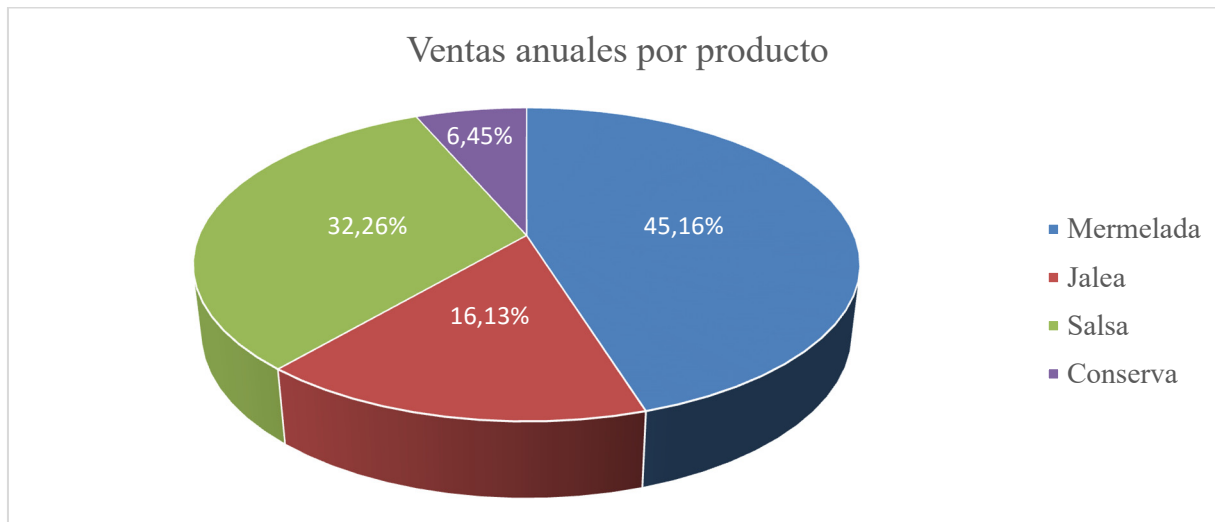


Figura 17. Ventas anuales del 2014 por tipo de producto

Como se observa en el gráfico de pastel, la línea de mermeladas es la de mayor fuerza de ventas en esta empresa familiar, la misma que cuenta con 45,16% de la venta anual.

En el año 2014, el Departamento de Calidad de la empresa registró una gran cantidad de reclamos por parte de los clientes de entidades comerciales, en lo que refiere a mermeladas. La distribución de estas no conformidades se expresan en la Figura 18.

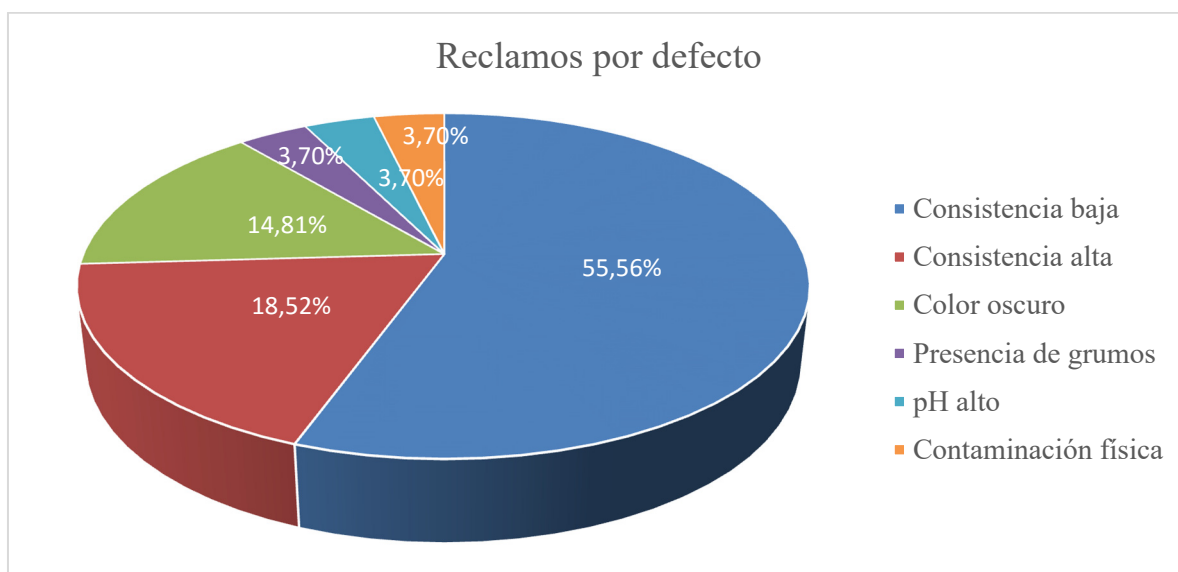


Figura 18. Reclamos por defecto

Se puede observar que el 55,56% de las no conformidades emitidas fueron por una consistencia baja en las mermeladas, seguidas por un 18,52% referente a consistencia alta.

Esto indica que existe un factor no controlado que influencia en la consistencia de la mermelada durante el proceso productivo.

Al realizar un análisis de trazabilidad a las no conformidades por consistencia baja y alta, se obtienen los siguientes datos representados en la Figura 19.

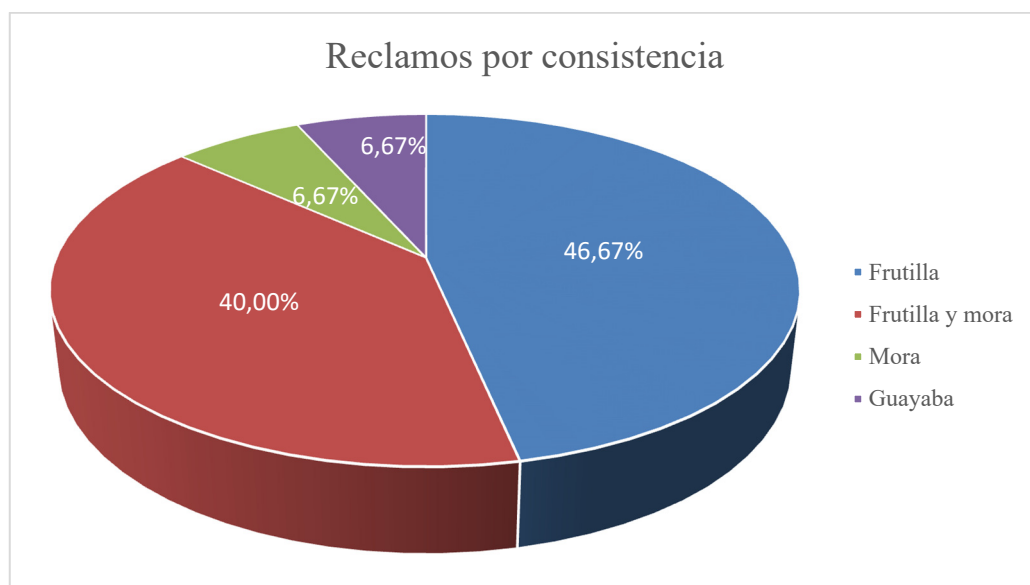


Figura 19. Reclamos por consistencia

El 46,67% de las no conformidades emitidas por el cliente sobre consistencia baja y alta es de mermelada de frutilla, seguida por la mermelada de frutilla y mora con el 40%. Como los productos con mayor cantidad de reclamos contienen frutilla como materia prima, se sospecha que tiene algún efecto en esta problemática. Es por ello que se decide realizar el presente estudio con la mermelada de frutilla. Para realizar un correcto análisis y encontrar la solución raíz a este problema, primeramente se detalla la descripción del proceso de manufactura de mermelada de frutilla aplicado en esta empresa familiar.

Se presenta en la Figura 20 un resumen de los datos obtenidos por el departamento de Aseguramiento de Calidad en cuanto a la consistencia de los productos terminados de mermelada de frutilla en el año 2014.

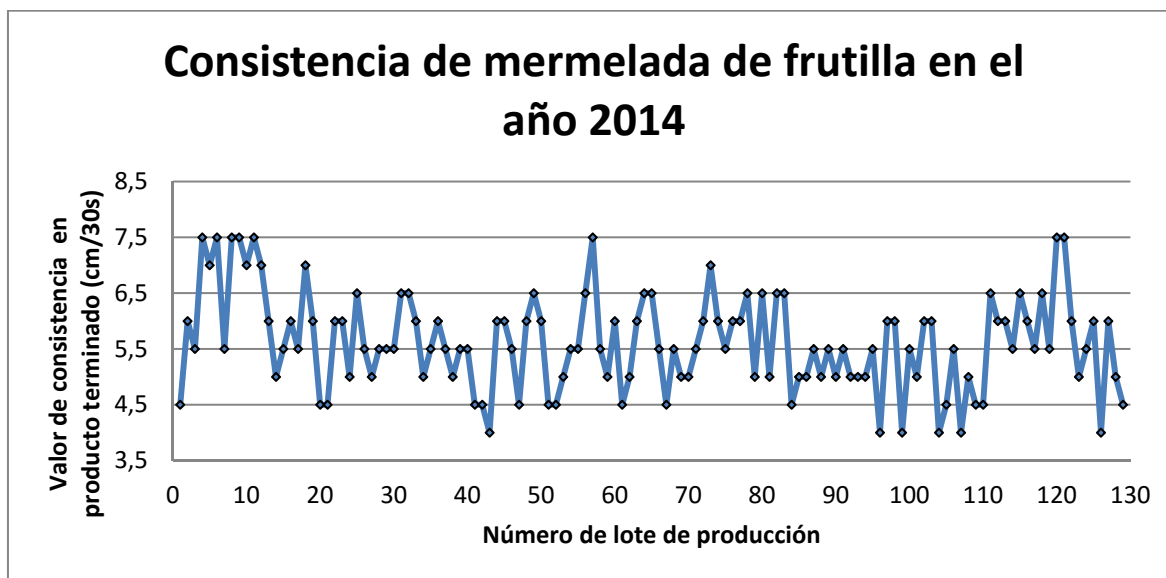


Figura 20. Consistencia de mermelada de frutilla en el año 2014.

La Ficha Técnica para producto terminado mermelada de frutilla especifica como parámetros de control en consistencia el rango de valores 4,0cm/30s a 7,5cm/30s. A pesar de que los datos de consistencia obtenidos al momento de liberación del lote se encuentran dentro de los parámetros establecidos en la ficha técnica de producto terminado, se reportan varios reclamos sobre el desempeño de la consistencia en el producto. Por este motivo, se desea investigar los posibles factores que causan esta variación, para así controlarlos y lograr una optimización y mejoramiento de la línea productiva de mermeladas de frutilla.

4.2 Descripción del proceso de mermelada de frutilla en la organización

4.2.1 Inspección, Recepción y Almacenamiento de Materia Prima

Las materias primas que se reciben en la planta de fabricación para la elaboración de mermelada de frutilla son: frutilla, pectina, antiespumante, azúcar, ácido cítrico y benzoato de sodio. A continuación se presenta información importante sobre cada una de estos ingredientes para lograr un mayor entendimiento del proceso.

La frutilla proviene de seis proveedores distintos que tienen plantaciones de esta fruta cercanas a la ciudad. Se recibe la frutilla fresca con 24 horas de anterioridad a realizar el proceso de fabricación, lo que garantiza la frescura de la fruta. Por medio de Acuerdos de Calidad con los proveedores, se resuelve que la cosecha de la frutilla debe ser hasta 72 horas como máximo antes de la entrega, ya que con un tiempo mayor la fruta se puede deteriorar. Además, se exige a los proveedores que al cosechar la frutilla, eliminen las hojas verdes superiores para prevenir y disminuir los posibles contaminantes físicos. La frutilla es inspeccionada por el personal de calidad de las empresas al ingreso y en laboratorio antes de ser almacenada. Si la fruta es aceptada tras el análisis en laboratorio, es almacenada en cámaras de refrigeración (con temperatura máxima de 12°C) hasta su utilización.

El gelificante es una pectina rápida de alta metoxilación, la cual permite elaborar mermeladas con trozos de fruta. Esta materia prima es importada, por lo que se cuenta con un stock de seguridad. De igual forma, la materia prima es inspeccionada y analizada en el laboratorio, y al ser aceptada, se almacena en cámara a temperatura ambiente (máximo 25°C) y la humedad del ambiente (máximo 60% de humedad relativa).

El azúcar, ácido cítrico, antiespumante y benzoato de sodio son inspeccionados y analizados al ingresar a planta, y de igual forma son almacenados en una cámara con control de temperatura (máximo 25°C) y humedad del ambiente (máximo 60% de humedad relativa).



(a)



(b)



(c)

Figura 21. Recepción, Inspección y Almacenamiento de la frutilla

- a. Recepción de frutilla en varios grados de madurez
- b. La frutilla es colocada en bidones para su almacenamiento
- c. Muestra de frutilla para el análisis físico-químico y sensorial en laboratorio

4.2.2 Selección, Lavado y Troceado de la fruta

Al inicio de la fabricación de la mermelada de frutilla, la cantidad de fruta a ser procesada ingresa a una fase de selección donde se elimina frutas deterioradas, picadas, y contaminantes físicos como hojas, piedras, ramas, etc. Posteriormente, pasa a un proceso de lavado con agua clorada y un enjuague con agua potable. Se deja secar a la frutilla en canastas por un período de 30 minutos, para disminuir la cantidad de agua que ingresa al proceso. Finalmente, la fruta es troceada con la ayuda de una máquina trituradora que procesa 10 kilos de frutilla por minuto. En este paso se toma una muestra de °Brix y pH de la fruta, como parte del control de proceso.



(a)

(b)

Figura 22. Operador en proceso de troceado de fruta

a. Alimentación de frutilla en el triturador para su troceado

b. Salida de la frutilla troceada del triturador

4.2.3 Pesaje y dosificación de ingredientes

El área de dosificación pesa todos los ingredientes de acuerdo al plan productivo diario, es decir, de acuerdo al número de batch que se van a realizar. Cada lote pesado es codificado y colocado en un coche para ser transportado al área de fabricación de mermeladas.



(a)

Figura 23. Pesaje de ingredientes para mermelada de frutilla

a. Operadores en área de pesaje de ingredientes

4.2.4 Mezcla de ingredientes y Cocción

La fruta troceada se coloca en tinajas las cuales tienen una medición volumétrica para indicar la cantidad a colocar para cada lote. En estas tinajas se coloca los 3/4 del azúcar, benzoato de sodio y el antiespumante, se realiza una mezcla con la fruta y ésta es succionada por tuberías con vacío al concentrador. Tras 30 minutos de cocción, se coloca el ácido cítrico. Después de 20 minutos de cocción, se mezcla en las tinajas el 1/4 de azúcar restante con la pectina, y nuevamente se transporta con tuberías de vacío. El concentrador trabaja con vacío a una presión de 0.8 atmósferas, con lo cual la mezcla se evapora a una temperatura de 60 a 70°C. El proceso total dura de 2 horas a 2 horas con 30 minutos aproximadamente, en la cual se obtiene dos toneladas de producto semielaborado. Se realiza la descarga del producto cuando la mezcla ha alcanzado como mínimo 65°Brix.

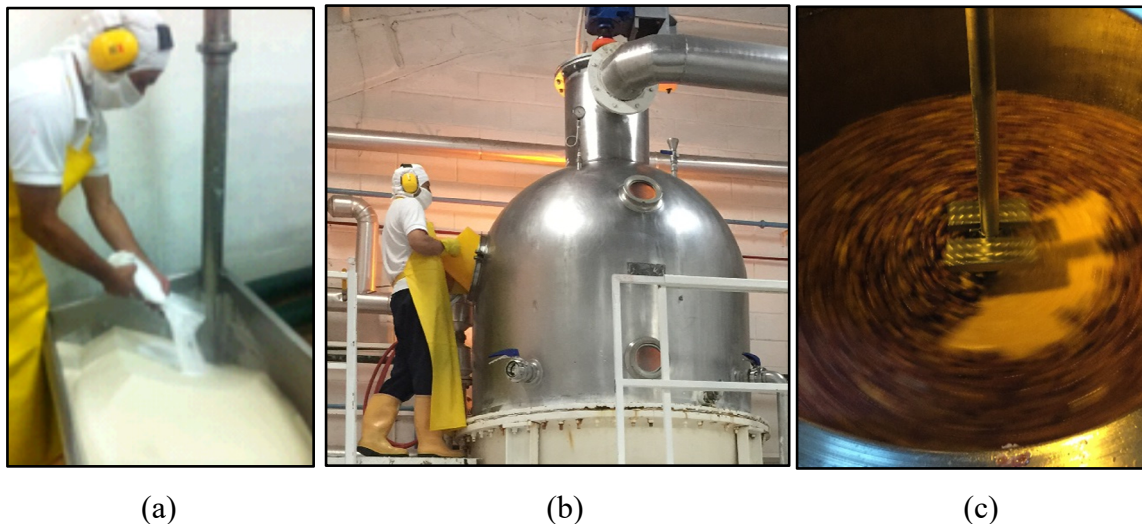


Figura 24. Proceso de mezcla de ingredientes y cocción de semielaborado

Fuente: Autor, Jessica Nájera

- a. Mezcla de ingredientes en tolvas volumétricas
- b. Carga de frutilla al concentrador
- c. Cocción de ingredientes en el concentrador

4.2.5 Esterilización de envases de vidrio

Los envases son lavados mediante vapor a 102°C, y posteriormente secados con inyección de aire mientras se colocan boca abajo y son enviados por bandas transportadoras al área de envasado. Al final de la banda transportadora se encuentra un scanner que revisa cada uno de los frascos de posibles contaminantes o rupturas del envase, y separa estos defectos automáticamente.



(a)

Figura 25. Esterilización de los envases de vidrio

a. Túnel de esterilización de frascos por inyección de vapor

4.2.6 Envasado, etiquetado, empacado, paletizado y almacenamiento

El envasado de los frascos se realiza en dos presentaciones: de 280g y 500g, ambas en vidrio. El producto semi-elaborado debe estar en una temperatura de 85°C como mínimo al momento de ser envasada. Además, en esta etapa también existe un control de proceso en cuanto al peso. Posteriormente, el producto es sellado con tapas metálicas adecuadas para cada presentación, asegurando la hermeticidad de la mermelada. Los envases son colocados en túneles de enfriamiento con agua fría, los que disminuyen la temperatura del producto. Finalmente, es etiquetado y codificado con los datos para cada lote, empacado en cajas que contienen 12 o 20 unidades, dependiendo de la presentación. Se paletiza las cajas y se almacenan en cámaras con control de temperatura (máximo 25°C) y humedad de ambiente (máximo 60% de humedad relativa).



(a)

Figura 26. Envasado, etiquetado y almacenamiento de producto

a. Envasadora automática de jaleas y mermeladas

4.2.7 Liberación de producto terminado y distribución

El personal del departamento de calidad analiza cada lote producido después de 24 horas de elaborar el producto. La empresa se rige bajo los requisitos solicitados en la Norma Técnica del Instituto Ecuatoriano de Normalización 0419 (1988). Si el producto es *liberado*, puede ser enviado a los distintos Centros de Distribución en Quito, Guayaquil o Cuenca.



(a)



(b)



(c)

Figura 27. Análisis Físico-Químicos y Sensoriales para Liberación de producto.

- a. Toma de muestra de producto para liberación
- b. Análisis de pH
- c. Análisis de consistencia

5. APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

5.1 Planificación del diseño experimental

5.1.1 Definir el problema y objetivo

El problema que se desea estudiar y resolver es la variabilidad en la consistencia que la mermelada de frutilla presenta actualmente. Es así como el 55,56% de las no conformidades emitidas en el año 2014 por parte de los clientes fueron por una consistencia baja en las mermeladas, seguidas por un 18,52% referente a consistencia alta. De la suma de estos porcentajes, el 46,67% de estas no conformidades sobre consistencia baja y alta fueron reclamos de mermelada de frutilla.

En la planta productiva de manufactura existe una metodología implementada para el análisis y resolución de problemas, la cual es liderada por el Departamento de Calidad. El objetivo de esta metodología es asegurar el sostenimiento en el tiempo mediante la normalización, capacitación, difusión y reconocimiento de las medidas tomadas por el análisis sistematizado de las problemáticas presentadas.

Los Departamentos que están involucrados en el análisis de la problemática actual de “Disminución en la variabilidad de la consistencia de mermelada de frutilla” son: el Departamento de Calidad, Producción y Mantenimiento. Para iniciar el análisis del problema según la metodología implementada, se utiliza la herramienta del diagrama de espina de pescado.

5.1.2 Realizar un esquema de estudio sobre el problema planteado

Diagrama de Espinas de Pescado: El diagrama de espina de pescado, o también llamado diagrama causa-efecto es un método gráfico que busca organizar y representar las diferentes hipótesis y teorías propuestas en forma de lluvia de ideas como causas hacia el efecto que es la problemática. (Gutiérrez, 2005). En otras palabras, es una gráfica que relaciona el efecto (problemática) con sus posibles causas (varias hipótesis).

Para este caso práctico, el efecto que tenemos es la variación de consistencia en la mermelada de frutilla, y las posibles causas están detalladas bajo cada espina con las diferentes variables que influyen en el proceso de elaboración de mermelada. Así se tiene la Figura 28.

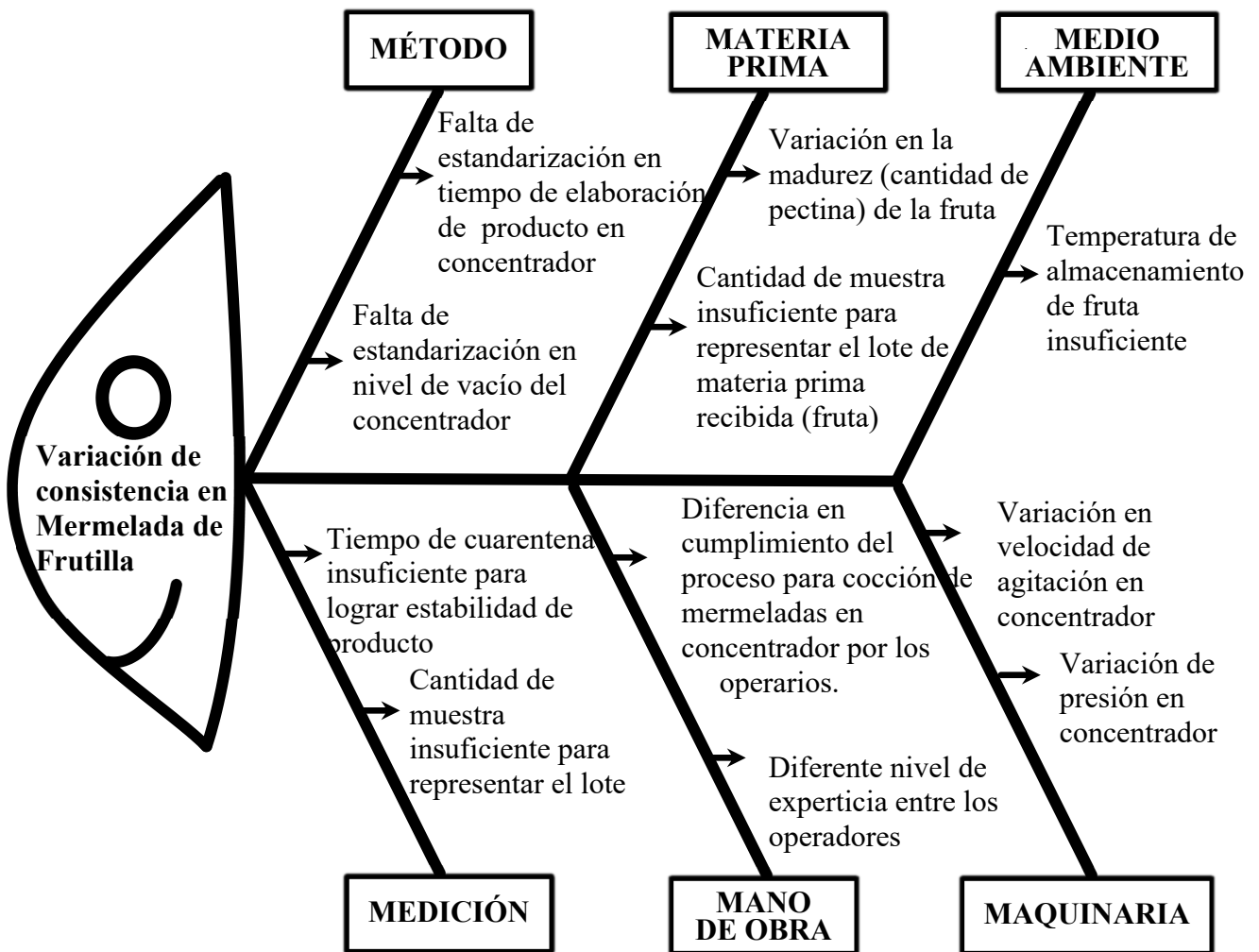


Figura 28. Diagrama de Causa – Efecto para disminución de la variabilidad de consistencia en Mermelada de Frutilla

A continuación, para cada una de las posibles causas planteadas en el diagrama, se establece variables de operación o proceso, de forma que puedan ser estudiadas en el experimento. Adicionalmente, se detalla la razón por la que cada posible causa fue considerada como factor en la experimentación.

5.1.3 Determinar los factores y niveles de cada factor que van a investigarse

Una vez que se ha aplicado una lluvia de ideas para generar las hipótesis de causas que está generando la variación en la consistencia de la mermelada de frutilla, se determina los factores y niveles que van a ser parte del estudio. Los factores escogidos y su razón se detallan en la Tabla 16.

Tabla 16. Factores de estudio para disminuir la variabilidad de consistencia en mermelada de frutilla

M	POSIBLE CAUSA	FACTOR DE ESTUDIO	UNIDAD DE MEDICIÓN
MÉTODO	Falta de estandarización en tiempo de elaboración de producto en concentrador. <i>Razón:</i> Un tiempo excesivo del producto semielaborado en el concentrador puede degradar la pectina provocando una consistencia baja. Por otro lado, un tiempo corto no permite el desarrollo de la red de pectina.	Tiempo de cocción en concentrador	Minutos (min.)
	Falta de estandarización en nivel de vacío del concentrador en elaboración del producto. <i>Razón:</i> Un bajo nivel de vacío da como consecuencia una mayor temperatura de cocción en el concentrador provocando una degradación de la pectina y una menor consistencia en el producto.	Presión del concentrador	Milímetros de mercurio (mmHg)
MATERIA PRIMA	Variación en la madurez de la fruta <i>Razón:</i> Fruta muy madura presenta menor cantidad de pectina soluble, y una fruta inmadura presenta mayor cantidad de pectina insoluble. Ambas dan como resultado variación en la consistencia del producto.	pH y porcentaje de sólidos solubles en la frutilla	pH y Grados Brix (°Brix)

(Continúa)

MATERIA PRIMA	<p>Cantidad de muestra insuficiente para representar el lote de materia prima recibida (fruta).</p> <p>Razón: Al no tener una muestra representativa del lote de fruta para realizar los análisis de laboratorio, se puede aceptar materia prima fuera de las especificaciones definidas.</p>	Se verifica Plan de Muestreo sin encontrar inconsistencias	N/A
MEDIO AMBIENTE	<p>Temperatura de almacenamiento de frutilla insuficiente.</p> <p>Razón: La temperatura de almacenamiento de la frutilla desde que fue cosechada puede acelerar o disminuir la maduración de la fruta, lo cual varía la cantidad de pectina.</p>	Temperatura de cámaras de almacenamiento o refrigerado	Grados centígrados (°C)
MEDICIÓN	<p>Tiempo de cuarentena insuficiente para lograr estabilidad de producto.</p> <p>Razón: La consistencia del producto se desarrolla en el tiempo (con el enfriamiento del producto) por la formación de la red de pectina. Una medición de liberación del producto realizada en un tiempo insuficiente es una medición no confiable.</p>	Tiempo de cuarentena	Horas (h)
	<p>Cantidad de muestra insuficiente para representar el lote de producto.</p> <p>Razón: al no tener una muestra representativa del lote de producto semi-elaborado para realizar los análisis de laboratorio, se puede aceptar producto fuera de las especificaciones definidas.</p>	Se verifica Plan de Muestreo sin encontrar inconsistencias	N/A

(Continúa)

MANO DE OBRA	<ul style="list-style-type: none"> - Diferencia en el cumplimiento del proceso establecido para cocción de mermeladas en concentrador por parte de los operarios. - Diferente nivel de experticia entre los operadores. <p>Razón: diferencias involuntarias en el procedimiento de cocción que realizan los operadores del concentrador causa una variación en la consistencia del producto.</p>	Operador de concentrador	Operador A y Operador B
MAQUINARIA	<p>Variación en velocidad de agitación en el concentrador</p> <p>Razón: una alta velocidad de agitación puede romper las cadenas de pectina que forman la red, provocando una baja consistencia en el producto.</p>	Velocidad de agitador del concentrador	Revoluciones por minuto (rpm)
	<p>Variación de temperatura en concentrador</p> <p>Razón: una mayor temperatura de cocción en el concentrador provoca una degradación de la pectina, y así una menor consistencia en el producto. Sin embargo, el equipo no cuenta con un sistema que pueda medir la temperatura de cocción, por lo que se decide medir la presión, ya que ambos factores se relacionan directamente.</p>	Presión del concentrador	Milímetros de mercurio (mmHg)

A continuación se determina los niveles a los que se deberían someter idealmente cada factor durante el estudio. Sin embargo, dependiendo del diseño experimental que se escoja, se evaluarán el número de niveles por cada factor.

5.1.3.1 Operador de concentrador

Debido a que la planta industrial trabaja en dos turnos, se tiene dos operadores para el concentrador en el área de cocción de mermeladas. Los niveles para el factor de operador del concentrador son Operador del Turno A y Operador del Turno B.

5.1.3.2 pH y porcentaje de sólidos solubles en la frutilla.

Se realiza un análisis estadístico con los datos obtenidos de todos los 475 lotes de frutilla ingresados y aprobados en el año 2014. Los datos obtenidos se detallan en la Tabla 17.

Tabla 17. Análisis estadístico para los 475 lotes de frutilla aceptados en el año 2014

	pH	%SS
Número de datos (n)	475	475
Media (\bar{x})	3,55	8,35
Desviación estándar (σ)	0,07	0,54
Valor-p prueba de normalidad	<0,05	<0,05

Por revisión bibliográfica, se detecta que la madurez de la fruta no presenta un efecto lineal a la consistencia de la fruta, ya que tanto la fruta inmadura como la fruta muy madura dan una consistencia baja al producto. Por este motivo, se decide tomar tres niveles en los factores de pH y porcentaje de sólidos solubles en la frutilla.

Se decide tomar como niveles para este factor al valor de la media, al valor de 3 desviaciones estándar positivos y 3 desviaciones estándar negativos, como se expresa en la Tabla 18.

Tabla 18. Niveles para los factores de pH y porcentaje de sólidos solubles

	pH	%SS
\bar{x}	3,55	8,35
$\bar{x} + 3\sigma$	3,76	10
$\bar{x} - 3\sigma$	3,34	6,7

5.1.3.3 *Velocidad de agitador del concentrador*

El agitador del concentrador se puede colocar únicamente en tres velocidades (alta, media y baja). Para tener un dato numérico, se realiza previamente pruebas para determinar las revoluciones por minuto que representan cada una de las velocidades ajustadas y así documentarlo en el presente estudio. Con ayuda de un cronómetro digital, se determina lo siguiente:

- Velocidad alta es 32rpm
- Velocidad media es 28rpm
- Velocidad baja es de 25rpm.

El proceso actual se realiza en velocidad media, sin embargo se considera que en esta oportunidad se puede definir mediante experimentación cuál es la mejor velocidad con la que se debe elaborar la mermelada de frutilla.

5.1.3.4 *Tiempo de Cuarentena para liberar el lote de producción*

Actualmente, el lote de producto semielaborado es analizado por laboratorio para ser liberado, en cuarentena o rechazado al terminar el turno (6 horas), al finalizar el próximo turno (12 horas) o al día siguiente (24 horas), dependiendo de la cantidad de lotes producidos en cada turno. Sin embargo, por experiencia de los inspectores de calidad, prefieren realizarlo con un día de diferencia para que el producto a analizar ya este estable. En el presente estudio experimental se desea determinar el mejor tiempo para realizar la liberación de los lotes producidos, por lo que se consideran los tres escenarios mencionados:

- A 6 horas de elaborado el lote
- A 12 horas de elaborado el lote
- A 24 horas de elaborado el lote

5.1.3.5 *Tiempo de cocción en concentrador y presión del concentrador*

En la elaboración de mermelada de frutilla, se detiene el proceso cuando el producto semielaborado alcanza o sobrepasa los 65°Brix. Para esto, se monitorea la mezcla desde que cumple las 2 horas hasta 2 horas con 30 minutos. Sin embargo, para poder mejorar la

productividad del área, es necesario definir un tiempo adecuado para que la mermelada alcance la especificación deseada con un proceso más controlado.

Además, la experiencia de los operadores establece que la presión colocada en el concentrador puede tener influencia sobre el tiempo de cocción de la mermelada. Por este motivo, se desea comprobar o rechazar la existencia de esta relación mediante este diseño experimental.

Para establecer los niveles de estos factores, se realiza un estudio estadístico con los datos obtenidos en el control de proceso de producto semielaborado de todos los lotes de frutilla ingresados y aprobados en el año 2014. Los datos de tiempo analizados son muy variables y no cumplen una distribución normal, por lo que se decide trabajar con categorías de tiempo que incluyen todo el rango de los datos. Así se obtiene:

- De 2 horas a 2 horas y 10 minutos (120 minutos a 130 minutos)
- De 2 horas y 10 minutos a 2 horas y 20 minutos (130 minutos a 140 minutos)
- De 2 horas y 20 minutos a 2 horas y 30 minutos (140 minutos a 150 minutos)

Por otro lado, la presión del concentrador se establece de acuerdo a los datos que el manual del equipo recomienda, los cuales son de -12mmHg a -18mmHg. (Marrodan, 1989)

5.1.3.6 Temperatura de cámaras de almacenamiento refrigerado

Existe una cámara de refrigeración en donde se almacena la materia prima fresca de un día para otro, hasta su utilización. Sin embargo, dependiendo de la cantidad de producto que se coloque en la cámara y sobre todo del tiempo de carga, puede existir variación en la temperatura de almacenamiento. Por este motivo, se escoge rangos de temperatura para realizar el presente experimento, los cuales son:

- De 0°C a 4°C
- De 4°C a 8°C
- De 8°C a 12°C

A continuación se presenta un resumen de los factores de estudio y los niveles a los que serán sometidos cada uno. Adicionalmente, se presentan los códigos que serán usados a lo largo de la experimentación para facilidad del lector en la Tabla 19.

Tabla 19. Factores de estudio y niveles de cada factor

CODIGO DE FACTOR	NOMBRE DE FACTOR	CODIGO DE NIVEL	NOMBRE DEL NIVEL
FACTOR A	Operador de concentrador	-1	Operador Turno A
		1	Operador Turno B
FACTOR B	pH de la frutilla	-1	3,34
		0	3,55
		1	3,76
FACTOR C	Porcentaje de solidos solubles de la frutilla	-1	6,7 ° Brix
		0	8,3 ° Brix
		1	10,0 ° Brix
FACTOR D	Velocidad de agitador del concentrador	-1	Baja (25 rpm)
		0	Media (28 rpm)
		1	Alta (32 rpm)
FACTOR E	Tiempo de Cuarentena	-1	6 horas
		0	12 horas
		1	24 horas
FACTOR F	Tiempo de cocción en concentrador	-1	de 120 minutos a 130 minutos
		0	de 130 minutos a 140 minutos
		1	de 140 minutos a 150 minutos
FACTOR G	Presión del concentrador	-1	-12 mmHg
		0	-15 mmHg
		1	-18 mmHg
FACTOR H	Temperatura de las cámaras de almacenamiento refrigerado	-1	de 0°C a 4°C
		0	de 4°C a 8°C
		1	de 8°C a 12°C

5.1.4 Elegir las variables de respuesta

Debido a que el objetivo del experimento es reducir la variabilidad de la consistencia de la mermelada de frutilla, la variable de respuesta para este estudio es consistencia.

El procedimiento para medir la consistencia del producto es el siguiente:

- a. Nivelar el consistómetro.
- b. Colocar la muestra de producto en el congelador hasta que la temperatura sea de 20°C a 25°C.
- c. Rellenar la cavidad del consistómetro completamente (al ras). Observar que no se formen burbujas.
- d. Activar la guillotina y tomar el tiempo con un cronómetro digital por 30 segundos.
- e. Con la escala del consistómetro, tomar la medida que alcanzó la muestra de producto en los 30 segundos.
- f. Lavar el equipo.

5.1.5 Seleccionar el diseño experimental adecuado para los factores escogidos

Se puede observar que para el presente experimento al momento se tiene 8 factores de estudio, de los cuales 1 factor presenta 2 niveles, y los 7 factores restantes tienen 3 niveles cada uno. Para escoger adecuadamente el diseño experimental a realizar, es necesario analizar todas las posibilidades de acuerdo a los objetivos de experimento y los recursos destinados para realizar el ensayo.

Para realizar cada corrida experimental, se considera la cantidad del batch mínimo de producción que es la capacidad mínima del concentrador para realizar la mermelada. En este caso, la cantidad mínima corresponde a 1000kg de producto terminado. Para realizar los cálculos pertinentes, se considera un 85% de rendimiento. Además, debido la planificación semanal de producción, cada corrida experimental ejecutará una vez a la semana, cada viernes al cierre de turno. De esta forma se disminuye el impacto de paradas de proceso por la experimentación, y así también disminuye el costo de oportunidad. Por lo tanto, el número de corridas determinará el número de semanas que durará el experimento en su realización.

En resumen el costo para realizar cada corrida experimental se expresa en la Tabla 20.

Tabla 20. Resumen de necesidad de recursos por cada corrida experimental

RECURSO	COSTO APROXIMADO
Materia prima	\$ 1100
Material de empaque	\$ 1000
Operatividad	\$ 2300
Indirectos	\$ 400
Costo total	\$ 4800
Tiempo	1 semana
Recurso humano	3 personas por cada turno (operador, analista de calidad, bodeguero)

Con estas consideraciones previas, a continuación se detallan algunas opciones más adecuadas para realizar este experimento, con sus ventajas y desventajas.

5.1.5.1 *Diseño de Cuadro Greco-Latino*

Se puede disminuir el número de factores de estudio mediante la técnica de bloqueo. Con el diseño de Cuadro Greco-Latino se puede utilizar tres factores de bloque más un factor principal. Para la ejemplificación de este diseño, se utilizará como factor principal al porcentaje de sólidos solubles en sus tres niveles (6,7°Brix, 8,3°Brix y 10,0°Brix) y los factores de bloque con sus tres niveles serán presión del concentrador (-12mmHg, -15mmHg y -18mmHg), velocidad de agitación del concentrador (25rpm, 28rpm y 32rpm) y valores de pH de la fruta (3,34, 3,55 y 3,76).

Para el caso de los demás factores, se deberá utilizar la técnica de nulificación del efecto. Esto se logra mediante la fijación de un solo valor para el resto de factores de la siguiente forma, para el factor temperatura de almacenamiento de la fruta, se escoge el valor de 0°C a 4°C. Esto significa que todas las corridas experimentales se realizan con fruta almacenada de 0°C a 4°C durante todo el experimento. Del mismo modo, el producto de todas las corridas experimentales será liberado en un tiempo de 12 horas, el tiempo de

cocción será de 130 a 140 minutos y se serán realizadas por el mismo operador. Para este caso particular, el diseño de cuadro Greco-Latino se detalla en la Tabla 21.

Tabla 21. Diseño de cuadro Greco-Latino para disminución de variabilidad en consistencia de mermelada de frutilla

		Factor de Bloque: Presión del concentrador		
		-12mmHg	-15mmHg	-18mmHg
Factor de Bloque: velocidad de agitación del concentrador	25 rpm	C δ (1)	B β (4)	A α (7)
	28 rpm	A β (2)	C α (5)	B δ (8)
	32 rpm	B α (3)	A δ (6)	C β (9)

Donde,

los números del 1 al 9 son las corridas experimentales

A, B, C son los °Brix de la fruta (6,7°Brix, 8,3°Brix y 10,0°Brix respectivamente)

α , β y δ son los valores de pH de la fruta (3,34, 3,55 y 3,76)

Para realizar el experimento bajo un diseño de cuadro greco-latino, se toma en cuenta a 9 corridas experimentales, por lo que se necesitarían los recursos mostrados en la Tabla 22.

Tabla 22. Recursos para utilizar Diseño de Cuadro Greco-Latino

Recurso económico total en producción:	\$ 43 200
Recurso humano:	3 personas
Recurso de tiempo:	2 meses 1 semana

La desventaja de utilizar el diseño experimental Cuadro Greco-Latino para el presente caso particular de estudio sobre disminución de la variabilidad de consistencia en la mermelada de frutilla es que se pierde valiosa sobre los cuatro factores que fueron nulificados, los cuales son la temperatura de almacenamiento, tiempo de liberación del lote, operador y tiempo de cocción.

5.1.5.2 *Diseño Factorial Completo*

El diseño factorial permite analizar todos los factores al mismo tiempo. Para este caso se podría analizar los siete factores que tienen tres niveles, los cuales son: porcentaje de sólidos solubles y pH de la frutilla, tiempo de cocción en concentrador, tiempo de liberación del producto, velocidad de agitación en el concentrador, presión en el concentrador y temperatura de almacenamiento de la fruta, cada uno en tres niveles. Para el factor de operador, se debe realizar el experimento con el mismo operador para nulificar este efecto. Así se obtiene como resultado un diseño factorial completo 3^7 . Sin embargo, al analizar el número total de corridas, da un total de 2 187 corridas, el cual es un número muy grande. Por este motivo, se debe disminuir la cantidad de factores a un número más manejable, y disminuir el número de niveles por factor.

En el caso de escoger un diseño factorial completo, se decide trabajar con los siguientes factores a dos niveles cada uno: pH de la fruta (3,34 y 3,76), porcentaje de sólidos solubles de la fruta (6,7°Brix y 10°Brix), Velocidad de agitación del concentrador (25rpm y 32rpm) y presión de concentrador (-12mmHg y -18mmHg). El resultado es un diseño factorial completo 2^4 que será evaluado en 2 repeticiones, lo que significa que en total se realizará 16 corridas experimentales. Por otra parte, para los demás factores nuevamente se recurrirá a la técnica de nulificación del efecto fijando un solo valor para el resto de factores de la siguiente forma: el producto de todas las corridas experimentales será liberado en un tiempo de 12 horas, la fruta debe ser almacenada de 0°C a 4°C, el tiempo de cocción será de 130 minutos a 140 minutos, y todas las corridas serán realizadas por el mismo operador. Para este caso particular, el diseño Factorial Completo se muestra en Tabla 23.

Tabla 23. Diseño Factorial Completo para disminución de variabilidad en consistencia de mermelada de frutilla

				Velocidad de Agitación del Concentrador			
				25rpm	25rpm	32rpm	32rpm
				Presión del concentrador			
				-12mmHg	-18mmHg	-12mmHg	-18mmHg
pH	3,34	Porcentaje de sólidos solubles	6,7°Brix	(1)	(5)	(9)	(13)
	3,34		10,0°Brix	(2)	(6)	(10)	(14)
	3,76		6,7°Brix	(3)	(7)	(11)	(15)
	3,76		10,0°Brix	(4)	(8)	(12)	(16)

Donde,

los números del 1 al 16 son las corridas experimentales

Para realizar el experimento bajo un diseño factorial completo, se consideran 16 corridas experimentales, se necesitarían los recursos detallados en la Tabla 24.

Tabla 24. Recursos para utilizar Diseño Factorial Completo

Recurso económico total en producción:	\$ 76 800
Recurso humano:	3 personas
Recurso de tiempo:	4 meses

Fuente: Autor, Jessica Nájera

La desventaja de utilizar este diseño para este caso particular de estudio de disminución de variabilidad de consistencia en la mermelada de frutilla es que se pierde valiosa información sobre los cuatro factores que se nulificó su efecto en el experimento, los cuales son tiempo de liberación del lote, temperatura de almacenamiento de la fruta, tiempo de cocción de la mermelada en el concentrador y operador.

5.1.5.3 Diseño Factorial Fraccionado

Mediante el diseño factorial fraccionado se puede analizar a todos los ocho factores y dos niveles de cada factor con un número razonable de corridas experimentales, y sin perder valiosa información resultante del experimento, tomando como premisa que las relaciones

entre factores son lineales. Para reducir el número de corridas se toma como fracción 1/16, y se analizan las interacciones hasta un cuarto nivel. Así se obtiene que, los generadores del diseño son:

$$E = BCD; F = ACD; G = ABC; H = ABD$$

Mientras que las estructuras alias serían:

1. $I + ABCG + ABDH + ABEF + ACDF + ACEH + ADEG + AFGH + BCDE + BCFH + BDFG + BEGH + CDGH + CEFG + DEFH$
2. $A + BCG + BDH + BEF + CDF + CEH + DEG + FGH$
3. $B + ACG + ADH + AEF + CDE + CFH + DFG + EGH$
4. $C + ABG + ADF + AEH + BDE + BFH + DGH + EFG$
5. $D + ABH + ACF + AEG + BCE + BFG + CGH + EFH$
6. $E + ABF + ACH + ADG + BCD + BGH + CFG + DFH$
7. $F + ABE + ACD + AGH + BCH + BDG + CEG + DEH$
8. $G + ABC + ADE + AFH + BDF + BEH + CDH + CEF$
9. $H + ABD + ACE + AFG + BCF + BEG + CDG + DEF$
10. $AB + CG + DH + EF + ACDE + ACFH + ADFG + AEGH + BCDF + BCEH + BDEG + BFGH$
11. $AC + BG + DF + EH + ABDE + ABFH + ADGH + AEFG + BCDH + BCEF + CDEG + CFGH$
12. $AD + BH + CF + EG + ABCE + ABFG + ACGH + AEFH + BCDG + BDEF + CDEH + DFGH$
13. $AE + BF + CH + DG + ABCD + ABGH + ACFG + ADFH + BCEG + BDEH + CDEF + EFGH$
14. $AF + BE + CD + GH + ABCH + ABDG + ACEG + ADEH + BCFG + BDFH + CEFH + DEFG$
15. $AG + BC + DE + FH + ABDF + ABEH + ACDH + ACEF + BDGH + BEFG + CDFG + CEGH$
16. $AH + BD + CE + FG + ABCF + ABEG + ACDG + ADEF + BCGH + BEFH + CDFH + DEGH$

Tabla 25. Diseño Factorial Fraccionado para disminución de variabilidad en consistencia de mermelada de frutilla

No. Corrida	FACTORES							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
4	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1
10	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
13	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
15	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1
16	1	1	1	1	1	1	1	1

Para realizar el experimento bajo un diseño factorial fraccionado, se realizarían 16 corridas experimentales sin réplica, se necesitarían los recursos detallados en la Tabla 26.

Tabla 26. Recursos para utilizar Diseño Factorial Completo

Recurso económico total en producción:	\$ 76 800
Recurso humano:	6 personas
Recurso de tiempo:	4 meses

Fuente: Autor, Jessica Nájera

La desventaja de utilizar el diseño fraccionado es que no se puede analizar todos los niveles de los factores, es decir tres niveles por factor, ya que se debe homologar el número de niveles, para este caso particular de estudio, todos los factores se reducen a dos niveles.

5.1.5.4 Diseño Ortogonal

Para el caso del estudio que se compone de siete factores de tres niveles y un factor con dos niveles, se podría realizar el experimento mediante un diseño de arreglo ortogonal L18 (2×3^7) el cual se detalla en la Tabla 27.

Tabla 27. Diseño de Arreglo Ortogonal L18 (2×3^7) para disminución de variabilidad en consistencia de mermelada de frutilla

No. Corrida	FACTORES							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0	0	0	0	0	0
3	-1	-1	1	1	1	1	1	1
4	-1	0	-1	-1	0	0	1	1
5	-1	0	0	0	1	1	-1	-1
6	-1	0	1	1	-1	-1	0	0
7	-1	1	-1	0	-1	1	0	1
8	-1	1	0	1	0	-1	1	-1
9	-1	1	1	-1	1	0	-1	0
10	1	-1	-1	1	1	0	0	-1
11	1	-1	0	-1	-1	1	1	0
12	1	-1	1	0	0	-1	-1	1
13	1	0	-1	0	1	-1	1	0
14	1	0	0	1	-1	0	-1	1
15	1	0	1	-1	0	1	0	-1
16	1	1	-1	1	0	1	-1	0
17	1	1	0	-1	1	-1	0	1
18	1	1	1	0	-1	0	1	-1

Este experimento requiere de 18 corridas experimentales, por lo que los recursos utilizados se expresan en la Tabla 28.

Tabla 28. Recursos para utilizar Diseño Factorial Completo

Recurso económico total en producción:	\$ 86 400
Recurso humano:	6 personas
Recurso de tiempo:	4 meses y medio

La desventaja de utilizar el diseño de arreglo ortogonal es la mayor cantidad de corridas experimentales, sin embargo, es el diseño que mejor y mayor cantidad de información va a proporcionar en esta etapa de entendimiento de los efectos de los factores.

Con el propósito de realizar una evaluación objetiva y así escoger el mejor diseño, se resuelve calificar a los diseños por la cantidad de recursos utilizados, y la cantidad y calidad de información que arrojará al terminar la experimentación, en el cual se emplea una escala del 1 al 5, siendo 1 la peor calificación y 5 la mejor calificación

En conjunto con todo el Departamento de Calidad, Producción y Mantenimiento, se elabora el cuadro comparativo de la Tabla 29, con el objetivo de tomar una decisión.

Tabla 29. Resumen y comparación de diseños experimentales considerados

Nombre del diseño experimental	Costo Total	Tiempo	Información
Diseño de Cuadro Greco-Latino	\$ 43 200	9 semanas	2,5
Diseño Factorial Completo	\$ 76 800	16 semanas	3,25
Diseño Factorial Incompleto	\$ 76 800	16 semanas	4,25
Diseño con arreglo ortogonal	\$ 86 400	18 semanas	4,5

Finalmente, a pesar de ser el diseño en el que más recursos se va a ocupar, se decide trabajar con el Diseño con Arreglo Ortogonal L18 (2×3^7) por la calidad de información que arrojará el estudio.

5.1.6 Planificar el trabajo experimental

A pesar de que Taguchi recomienda que los diseños ortogonales sean realizados en orden, siendo el factor A el que sea más difícil de controlar, con el Departamento de Calidad se decide realizar una aleatorización de acuerdo a lo indicado por los diseños clásicos. Posteriormente, se planifica de mejor manera el trabajo. Para cada una de las corridas, se fija la fecha de realización y los responsables a cargo.

Una vez realizada la aleatorización, se realiza una prueba de ortogonalidad de las corridas experimentales detalladas en la Tabla 30.

Tabla 30. Aleatorización del Diseño Experimental con Arreglo Ortogonal

No. Corrida	FACTORES							
	A	B	C	D	E	F	G	H
8	-1	1	0	1	0	-1	1	-1
16	0	1	-1	1	0	1	-1	0
5	-1	0	0	0	1	1	-1	-1
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
13	0	0	-1	0	1	-1	1	0
15	0	0	1	-1	0	1	0	-1
18	0	1	1	0	-1	0	1	-1
3	-1	-1	1	1	1	1	1	1
7	-1	1	-1	0	-1	1	0	1
14	0	0	0	1	-1	0	-1	1
11	0	-1	0	-1	-1	1	1	0
9	-1	1	1	-1	1	0	-1	0
6	-1	0	1	1	-1	-1	0	0
12	0	-1	1	0	0	-1	-1	1
17	0	1	0	-1	1	-1	0	1
4	-1	0	-1	-1	0	0	1	1
2	-1	-1	0	0	0	0	0	0
10	0	-1	-1	1	1	0	0	-1

Para la ejecución operativa de los ensayos, se genera el registro **Anexo 1. REG 02 – Plan de Experimentación**, en donde se anotan todos los resultados, observaciones, cambios y sobre todo, los responsables de ejecución en el caso de que se necesite aclarar dudas al momento de analizar los datos.

5.2 Realizar el experimento

Antes de realizar el experimento, se convoca a reunión a todo el personal involucrado que participará del ensayo para compartir el objetivo, el método de experimentación, el paso a paso, y aclarar las dudas que se puedan presentar. Adicionalmente, se explican los registros con los que se va a trabajar del presente estudio.

Cada corrida experimental se realiza en supervisión del Inspector de Calidad de turno, y al terminar se alimenta los datos obtenidos en un archivo estadístico del Programa Minitab 16. Además se archivan los registros con las firmas de responsabilidad junto al protocolo de experimentación en la carpeta de Mejoramiento Continuo de Procesos.

Los recursos reales utilizados en cuanto a recursos económicos fueron de \$87 300, mientras que la experimentación duró 20 semanas. El retraso en el tiempo de experimentación fue provocado por daños en la línea de producción, los cuales no tienen relación con el estudio. Se debe tener en cuenta que el producto terminado obtenido de cada corrida experimental fue comercializado, ya que se encontraba dentro de parámetros de liberación. Con esta aclaración, se plantea que el costo atribuido únicamente a la experimentación realizada es de \$ 900, por materiales y recursos administrativos utilizados.

Se destaca que la metodología utilizada permitió realizar el estudio al mismo tiempo que se cumplía con el plan de producción semanal, lo cual indica la flexibilidad que admite el diseño estadístico como herramienta de mejoramiento con relación a las actividades diarias operativas, las cuales se desarrollaron sin contratiempos.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados fueron analizados con ayuda del paquete estadístico Minitab versión 16, el cual proporciona gráficas con las cuales se analizan los efectos de cada factor estudiado en el diseño experimental. En el **Anexo 2. Manual de Operación en Minitab 16 para Diseño de Taguchi** el lector puede seguir el paso a paso del diseño y análisis del diseño estadístico utilizado en el presente estudio. La Figura 29 es la gráfica obtenida tras el análisis de datos del experimento realizado en el presente estudio.

Para realizar el análisis de datos de forma que no afecten a la percepción del consumidor, se toma de referencia a los resultados obtenidos por el Departamento de Análisis Sensorial de la planta productora, específicamente del panel sensorial entrenado para el área de jaleas y mermeladas. En el año 2010, el panel sensorial entrenado en su estudio “Características organolépticas de mermelada de frutilla a través de la vida útil física, química, microbiológica y organoléptica del producto” dentro del cual al comparar los resultados obtenidos del panel sensorial entrenado frente a los resultados obtenidos por estudio de preferencia de consumidor, determinó que la consistencia a la cual el consumidor desea para la mermelada de frutilla dentro de las características de textura es un valor cercano a 5cm/30segundos. Por este motivo, a lo largo del presente análisis, la consistencia de la mermelada de frutilla se considera que tiene un valor nominal es mejor de 5cm/30segundos para este estudio.

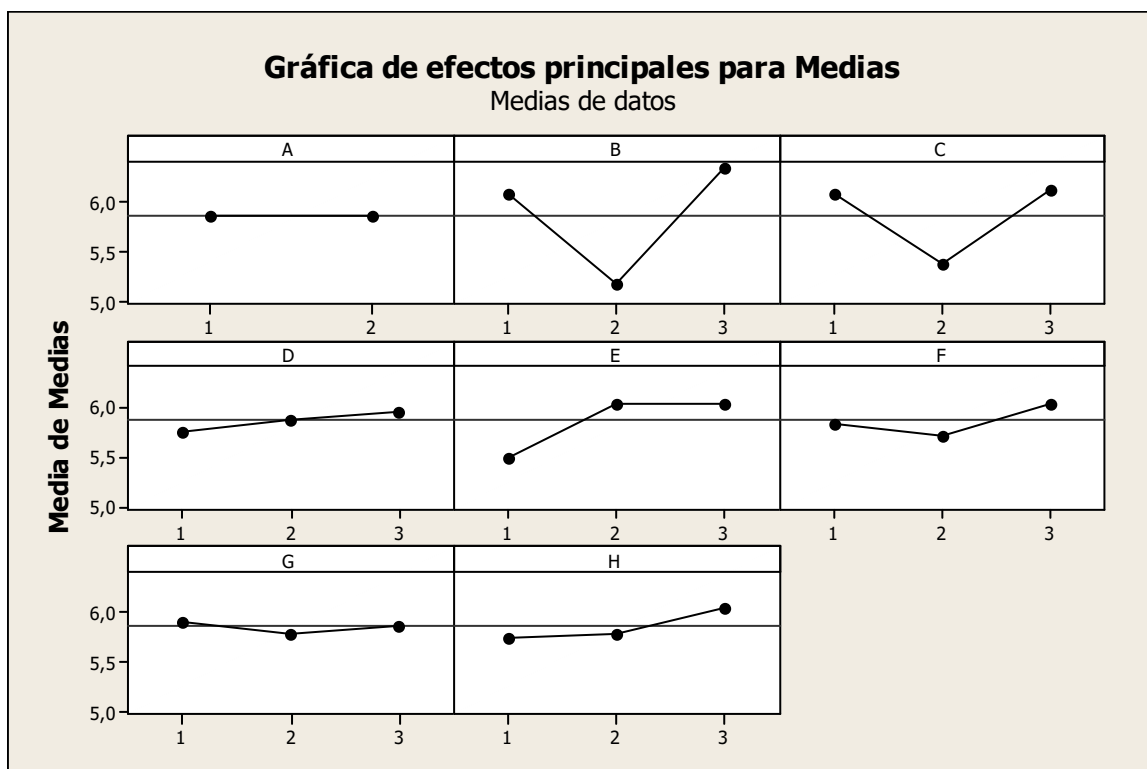


Figura 29. Efectos principales para medias de los factores de estudio

Operador de concentrador (Factor A)

Se observa que entre los dos niveles del factor A, es decir entre el operador A y el operador B no existe diferencia de resultados sobre la consistencia de la mermelada de frutilla. El resultado obtenido de media de medias en ambos niveles es de un valor de 5,86cm/30segundos para consistencia de la mermelada. Estos valores significan que ambos operadores están igualmente entrenados y no existe diferencia de manipulación y trabajo en el proceso que realiza cada uno, gracias a la estandarización que se maneja en la planta productiva. Adicionalmente, se concluye que el factor operador del concentrador no tiene una influencia sobre la consistencia de la mermelada de frutilla.

pH de la frutilla (Factor B)

La gráfica muestra que uno de los factores más influyentes en la respuesta de consistencia de la mermelada es el pH de la frutilla y el porcentaje de sólidos solubles de la frutilla, teniendo ambas una semejanza de comportamiento. Para el caso del pH de la frutilla, se observa que el nivel medio (pH de la fruta de 3,55) da un mejor resultado en la consistencia de la mermelada, ya que da un resultado de media de medias de 5,17 cm/30

segundos. Por otro lado, el nivel bajo (pH de la frutilla 3,34) arroja una media de 6,08 cm/30 segundos y con el nivel alto (pH de la frutilla 3,76) la media es de 6,33 cm/30 segundos. Por este motivo, se debería estrechar los parámetros de pH hacia un valor de 3,55 para la recepción de la materia prima frutilla, debido al impacto que representa en el producto terminado. Este hecho se puede lograr en conjunto de los proveedores mediante una negociación tanto en costo como en parámetros de calidad detallados en el Acuerdo de Calidad.

Porcentaje de sólidos solubles de la frutilla (Factor C)

Al analizar el porcentaje de sólidos solubles de la frutilla, nuevamente el nivel medio (8,3°Brix) muestra el mejor resultado al analizar su media, el cual es de 5,38cm/30segundos. El nivel bajo (6,7°Brix) y el nivel alto (10,0°Brix) muestran respectivamente una media de 6,08cm/30segundos y 6,13cm/30segundos de consistencia en la mermelada de frutilla final. Nuevamente, se debería realizar una negociación con los proveedores de la materia prima para estrechar los parámetros de porcentaje de sólidos solubles en la recepción de la frutilla, debido al impacto que representa en el producto terminado. El porcentaje de sólidos solubles en la materia prima frutilla si presenta una influencia para el resultado de consistencia en la mermelada de frutilla.

Velocidad del agitador del concentrador (Factor D)

Los valores obtenidos del factor de velocidad de agitación en el concentrador son muy similares, sin embargo se observa una tendencia en aumentar el valor de consistencia, con el aumento de la velocidad de agitación del concentrador. Para este caso, el mejor tratamiento es el nivel bajo (25 rpm) ya que da un valor de 5,75cm/30segundos. El nivel medio (28 rpm) tiene un valor de 5,88cm/30segundos y el nivel alto tiene un valor de 5,96cm/30segundos en cuanto a la media de consistencia para mermelada de frutilla. A pesar de que existe una tendencia de aumento en los niveles de este factor con relación a la consistencia de la mermelada, no se considera un factor de una gran influencia para la variable de respuesta.

Tiempo de Cuarentena (Factor E)

Los valores de consistencia de mermelada de frutilla para los diferentes niveles del factor tiempo de cuarentena son, para el nivel bajo (6 horas de reposo) un valor de 5,50 cm/30segundos, para el nivel medio (12 horas de reposo) es de 6,04 cm/30segundos , y finalmente para el nivel alto (24 horas de reposo) es de 6,04cm/30segundos. Se puede observar que en el nivel bajo obtiene el valor es el más cercano al deseado, sin embargo, en el nivel medio y alto el valor es el mismo. Por lo tanto, se concluye que la consistencia de la mermelada de frutilla del estudio se estabiliza a partir de las 12 horas de reposo, tiempo necesario para formar la red de pectina. Así, se debe evaluar la consistencia del lote, y proceder a la liberación o retención de acuerdo al valor obtenido y comparación con los parámetros establecidos para la mermelada de frutilla. Por este motivo, se escoge como mejor nivel de trabajo al nivel medio (12 horas de reposo).

Tiempo de cocción en concentrador (Factor F)

En cuanto al factor de tiempo de cocción en el concentrador, todos los niveles presentan valores similares, sin embargo el valor más bajo, pero no cercano al valor deseado, se obtiene en el nivel medio (de 130 a 140 minutos) con 5,71cm/30segundos de consistencia para la mermelada de frutilla, seguido muy cerca del nivel bajo (de 120 a 130 minutos) que es de 5,83cm/30segundos. El nivel alto (de 140 a 150 minutos) dio como resultado 6,04 cm/30segundos. Debido a que los valores del nivel bajo y medio son muy similares, se opta por una estandarización del tiempo al nivel bajo (de 120 a 130 minutos), con el objetivo de mejorar el tiempo de productividad de la línea operativa de mermeladas.

Presión del concentrador (Factor G)

Las medias de las consistencias de la mermelada de frutilla obtenidas de los diferentes niveles de las presiones del concentrador son muy similares. Se obtiene los siguientes resultados, para el nivel bajo (-12 mmHg) un valor de 5,92 cm/30segundos, para el nivel medio (-15mmHg) un valor de 5,79 cm/30segundos y para el nivel alto (-18mmHg) es de 5,88 cm/30segundos. Se observa que la presión del concentrador en los niveles estudiados no es un factor crítico a considerar en la preparación de mermelada de frutilla. Por este

motivo, se decide trabajar con la recomendación del proveedor del equipo que es una presión de -12mmHg.

Temperatura de las cámaras de almacenamiento refrigerado (Factor H)

Al analizar el efecto que tiene la temperatura de refrigeración en las cámaras de almacenamiento se nota un aumento de la consistencia de la mermelada en el nivel alto estudiado (de 8°C a 12°C) es de 6,04 cm/30segundos, por lo que se decide que la frutilla no debe ser almacenada a una temperatura mayor de 8°C por el efecto que da en el producto terminado. El nivel bajo (0°C a 4°C) y el nivel medio (de 4°C a 8°C) dan valores de media muy similares, así se tiene 5,75 cm/30segundos y 5,79 cm/30segundos respectivamente. Este resultado fortalece los lineamientos de la empresa bajo los requerimientos de Buenas Prácticas de Manufactura, donde la fruta fresca debe ser almacenada a temperaturas menores de 4°C, por lo que se decide trabajar con el nivel bajo de este factor (0°C a 4°C).

6.1 Análisis Estadístico de los Factores

Además de la Figura 29, el paquete estadístico Minitab versión 16 proporciona la Tabla 31 y Tabla 32 que nos ayudan a entender la relación que tiene cada uno de los factores sobre la variable de salida, es decir sobre la consistencia de la mermelada de frutilla, y también el nivel de influencia que tiene esta relación. La primera tabla nos proporciona si existe diferencia significativa o no entre los niveles aplicados para cada factor. Por ejemplo, en el Factor A, se indica mediante el valor estadístico p si los resultados del Operador A dio diferencia significativa en la consistencia de la mermelada de frutilla frente a los resultados obtenidos por el Operador B, y así para cada uno de los niveles de cada factor.

Tabla 31. Análisis de Varianza de Relaciones SN

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
A	1	0,0010	0,0010	0,00101	2,83	0,234
B	2	10,4968	10,4968	5,24841	14779,68	0,000
C	2	4,8594	4,8594	2,42969	6842,09	0,000
D	2	0,1514	0,1514	0,07569	213,15	0,005
E	2	2,7654	2,7654	1,38269	3893,70	0,000
F	2	0,6717	0,6717	0,33587	945,82	0,001
G	2	0,0520	0,0520	0,02598	73,16	0,013
H	2	0,4870	0,4870	0,24350	685,69	0,001
Error Residual	2	0,0007	0,0007	0,00036		
Total	17	19,4854				

Para el análisis de los factores, se ha escogido un nivel de confianza del 95%. En la Tabla 31 se observa que el único valor p que es mayor al valor α escogido es el correspondiente al Operador del concentrador (valor p 0,234 > valor α 0,05), lo que significa que el Factor A no presenta una diferencia significativa para la variable de salida.

Por otra parte, todos los demás factores si presentan una diferencia significativa, lo que significa que tienen influencia sobre la consistencia de la mermelada de frutilla. Con el objetivo de conocer el nivel de influencia que tiene cada uno de los factores sobre la variable de salida, se presenta la Tabla 32.

Tabla 32. Tabla de respuesta para relaciones de señal ruido – Más grande es mejor

Nivel	A	B	C	D	E	F	G	H
1	15,31	15,63	15,65	15,17	14,74	15,28	15,33	15,17
2	15,29	14,24	14,56	15,33	15,58	15,07	15,22	15,19
3		16,02	15,68	15,39	15,57	15,54	15,34	15,53
Delta	0,01	1,78	1,12	0,22	0,84	0,47	0,12	0,36
Clasificar	8	1	2	6	3	4	7	5

De la Tabla 32, la fila de Clasificar, nos brinda el orden en el que los factores afectan a la variable de salida. Se observa que el pH de la frutilla es el factor que más influye sobre la consistencia de la mermelada, seguida del porcentaje de sólidos solubles de la frutilla y el tiempo de cuarentena del producto terminado. Por otro lado, los factores que menos influyen sobre la consistencia de la mermelada son el operador del concentrador, seguido de la presión del concentrado y la velocidad de agitación del concentrador. En base a este análisis, se puede enfocar los esfuerzos para controlar con rigurosidad los factores que tienen mayor influencia sobre la variable de salida. Adicionalmente, se puede descartar a los factores que no es necesario controlar, en este caso de estudio es el Factor A, ya que ni siquiera presenta diferencia significativa.

6.2 Valor de predicción o valor de pronóstico

Para escoger el nivel a trabajar para cada factor de estudio, se utilizó la herramienta de Predicción del valor de Taguchi del paquete estadístico Minitab versión 16. Esta herramienta permite detectar interacciones de los niveles entre factores que a simple vista no se logra evidenciar. El valor de predicción o de pronóstico nos permite saber el valor que tendrá la variable de salida de acuerdo a los niveles seleccionados para cada factor, y evaluar si este resultado es cercano al valor deseado. En el **Anexo 3. Manual de Operación en Minitab 16 para Predecir resultado de Diseño de Taguchi** el lector puede seguir el paso a paso el procedimiento para obtener dicho valor.

Para el presente estudio, se analizó los siguientes niveles para cada uno de los factores:

Tabla 33. Mejor nivel para cada Factor

FACTOR	A	B	C	D	E	F	G	H
NIVEL	-1, 1	0	0	-1	0	-1	-1	-1

Se obtiene como resultado una media para la consistencia de la mermelada de frutilla de 4,7cm/30seg, el cual es un valor muy próximo al deseado (5cm/30seg). Esto quiere decir que si trabajamos con los niveles descritos anteriormente para cada factor, se obtendrá una consistencia de la mermelada muy aproximada al valor de 5cm/30seg.

Por este motivo, para la aplicación de los resultados del diseño experimental en planta de producción de forma continua, se decide trabajar con:

Tabla 34. Niveles de cada factor para la aplicación en planta productiva

FACTOR	NOMBRE DE FACTOR	NIVEL	NOMBRE DEL NIVEL
FACTOR A	Operador de concentrador	-1	Operador Turno A
		1	Operador Turno B
FACTOR B	pH de la frutilla	0	3,55
FACTOR C	Porcentaje de solidos solubles de frutilla	0	8,3 ° Brix
FACTOR D	Velocidad de agitador del concentrador	-1	Baja (25 rpm)
FACTOR E	Tiempo de Cuarentena	0	12 horas
FACTOR F	Tiempo de cocción en concentrador	-1	de 120 a 130 minutos
FACTOR G	Presión del concentrador	-1	-12 mmHg
FACTOR H	Temperatura de cámaras de refrigerado	-1	de 0°C a 4°C

7. APLICACIÓN EN PLANTA DE PRODUCCIÓN

Con los valores obtenidos en el análisis de resultados descrito en el capítulo anterior, se realizan 30 lotes de producción, y se comparan con los datos de consistencia de la mermelada de frutilla obtenidos en el año 2014, es decir antes de realizar el mejoramiento a la línea productiva. En la Tabla 35 se presentan dichos datos.

Tabla 35. Comparativo de valores de consistencia antes y después de realizar el estudio estadístico con Diseño de Taguchi

	Antes	Después
Lotes de mermelada de frutilla analizados	129	30
Promedio del parámetro consistencia (cm/30seg)	5,62	5,13
Desviación estándar del parámetro consistencia (cm/30seg)	0,87	0,43
Valor mínimo del parámetro consistencia (cm/30seg)	4	4,5
Valor máximo del parámetro consistencia (cm/30seg)	7,5	5,5

Se puede observar un mejoramiento en los resultados obtenidos, ya que el valor del promedio de la consistencia se acerca más al valor deseado (5cm/30seg). Adicionalmente, la desviación estándar de la consistencia es menor, lo que significa que los valores resultantes están más estandarizados. Este hecho también se ve reflejado en la disminución del rango de valores obtenido para la consistencia de la mermelada de frutilla.

Análisis estadístico de los datos obtenidos antes y después de la experimentación

A pesar de que se obtiene un valor promedio de consistencia de mermelada que nos indican de un mejoramiento, es imprescindible realizar un análisis estadístico que nos indique si estos valores de consistencia de mermelada de frutilla antes y después de realizar la experimentación tienen una diferencia significativa o no.

Para este efecto, se realiza una prueba de hipótesis para dos medias con la distribución normal estandarizada. Se decide trabajar con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para comprobar la hipótesis nula, la cual afirma que la media de los datos de consistencia de mermelada de frutilla antes de la experimentación es igual a la media de los datos de consistencia de mermelada de frutilla después de la experimentación.

$$H_0: \mu_{\text{antes de experimentación}} = \mu_{\text{después de experimentación}}$$

La fórmula utilizada para encontrar el calor estadístico z para la comparación de dos medias es:

$$z = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Donde,

z = valor estadístico de la distribución normal estandarizada

x_1 = media de la muestra 1

x_2 = media de la muestra 2

s_1 = desviación estándar de la muestra 1

s_2 = desviación estándar de la muestra 2

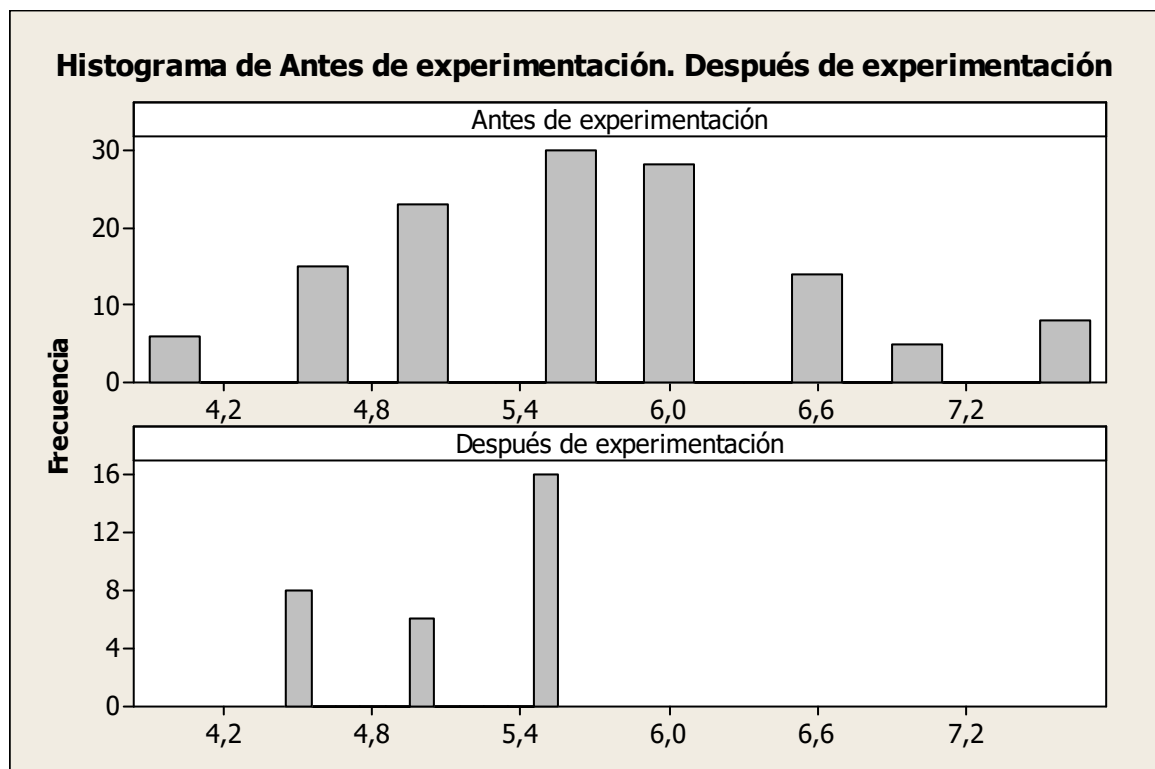
n_1 = tamaño de la muestra 1

n_2 = tamaño de la muestra 2

Con los datos expresados en la Tabla 35, se obtiene un valor estadístico de prueba calculado $z = 4,467$. De la Tabla de distribución normal estandarizada z se obtiene un valor de z crítico = 1,645. Al obtener que el valor z de la prueba (4,467) es mayor al valor z crítico (1,645) caemos en la zona de rechazo, es decir rechazamos la hipótesis nula que afirmaba la igualdad, y aceptamos que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los datos de la consistencia de la mermelada antes y después de la experimentación. Así se concluye que existe un mejoramiento de la consistencia de la mermelada de frutilla en la línea productiva después de utilizar herramientas del diseño experimental.

Con el objetivo de mostrar la distribución de los datos antes y después de la experimentación, se muestra la Figura 30. Se puede observar que la dispersión de los datos antes de la experimentación es mayor a los datos obtenidos después de la implementación. Además, los datos se concentran alrededor del valor de consistencia 5cm/30seg, lo cual es muy deseable.

Figura 30. Histograma de consistencia de la mermelada antes y después de la experimentación.



Adicionalmente, es importante mencionar que desde que se aplicó los resultados obtenidos por el Diseño Experimental de Taguchi, es decir 3 meses, no se han tenido quejas o reclamos de clientes por diferencia en la consistencia de la mermelada de frutilla.

8. CONCLUSIONES

Son varias las herramientas estadísticas que se pueden utilizar para mejorar las operaciones productivas, ya que permiten encontrar las variables que afectan al proceso y obtener los parámetros de control para disminuir la variabilidad. Sin embargo, es importante conocer y analizar la problemática que se desea estudiar, solo así se logra escoger la mejor herramienta a utilizar para obtener la mayor cantidad de información con el menor uso de recursos.

En este estudio, se analizó la problemática de variación de consistencia en la mermelada de fresa. Mediante la aplicación del diseño estadístico de Taguchi se encontró que los factores que tienen una mayor influencia sobre la consistencia de la mermelada de frutilla son el pH de la frutilla, el porcentaje de sólidos solubles de la frutilla y el tiempo de cuarentena que se debe considerar para liberar el lote. Para el factor de pH de la frutilla, el mejor valor obtenido fue en un nivel medio, es decir a un pH de 3,55. Con el factor de porcentaje de sólidos solubles de la frutilla, se obtuvo el mejor valor de consistencia con el nivel medio el cual es 8,3°Brix. Por último, al factor del tiempo de cuarentena para liberación del lote se decide que el mejor valor es el nivel medio estudiado, ósea 12 horas, ya que en este tiempo la estructura de red de pectina de la mermelada de frutilla se ha estabilizado.

Posteriormente, al aplicar los resultados del diseño experimental a la producción continua de la mermelada de frutilla, se obtiene un mejoramiento en los resultados de la consistencia, siendo en general más cercanos al valor deseado de 5,00cm/30seg. Es decir, que mediante el control de los factores estudiados en los niveles escogidos como óptimos, se logró una optimización productiva de la línea de mermeladas de frutilla.

A pesar de que el presente estudio se ejecutó bajo una problemática definida, el desarrollo del trabajo puede servir como fuente de consulta, tanto para la toma de decisiones dentro de la empresa que participó en su construcción, como ejemplo de procedimiento para instituciones externas que deseen realizar mejoras dentro de su proceso mediante herramientas estadísticas.

9. RECOMENDACIONES

Dentro de los factores que generan una mayor influencia sobre la consistencia de la mermelada de frutilla en el presente estudio, son el pH y el porcentaje de sólidos solubles de la materia prima frutilla. Por este motivo, se recomienda realizar un análisis de mayor profundidad sobre el comportamiento de estos factores. Para este efecto, se debe realizar un diseño factorial completo 3^2 , donde los factores de estudio sean el pH y porcentaje de sólidos solubles de la frutilla y se considere a la consistencia de la mermelada como variable de salida.

De los resultados obtenidos de este segundo estudio mencionado, se puede realizar otro análisis adicional, donde se obtenga la mejor combinación de los factores de influencia detectados para obtener valores de consistencia cercanos a los deseados. Es decir, se recomienda realizar un análisis de superficie de respuesta con los factores de pH de la frutilla y porcentaje de sólidos solubles de la frutilla para encontrar los valores óptimos de operación.

Una vez obtenidos los valores óptimos de operación para los factores de pH y porcentaje de sólidos solubles de la frutilla, se recomienda realizar un proceso de estandarización de la fruta por medio de ajuste a dichos valores como parte de la preparación de la materia prima antes de ingresar al proceso productivo.

10.BIBLIOGRAFIA

Acerete, A. (1950). *Frutas y verduras congeladas*. Zaragoza, España: Estación Experimental de Aula Dei.

Badui, S. (2006). *Química de los Alimentos*. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación de México S. A.

Barajas, N. (2011). *Propuesta de mejora utilizando diseño de experimentos en el desarrollo de técnicas analíticas en un laboratorio farmacéutico*. México D.F., México: Instituto Politécnico Nacional

Box, G., Hunter, J. & Hunter, W. (2008). *Estadística para Investigadores. Diseño, innovación y descubrimiento*. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.

Broomfield, R. (1997). *Elaboración de confituras, jaleas, flavorizantes y frutas secas*. En D. Arthey & P. Ashurst (Ed.), *Procesado de frutas* (pp. 385-426). Zaragoza, España: Editorial Acribia S. A.

Calvo, Miguel. (2004). *Bioquímica de los alimentos*. Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza. Recuperado de <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/programasbio.html>

Codex Alimentarius. (1995). *Norma General para los Aditivos Alimentarios CODEX STAN 192-1995*.

Coronado, M., & Hilario, R. (2001). *Elaboración de mermeladas, procesamiento de alimentos para pequeñas y microempresas agroindustriales*. Lima, Perú: Centro de Investigación, Educación y Desarrollo, CIED.

Dirección de Innovación y Desarrollo Productivo. (2009). *Modelo Micro emprendimiento: Fábrica de Mermeladas Artesanales*. Salta, Argentina: Ministerio de Desarrollo Económico, Secretaría de Pymes, Cooperativas y Social Agropecuario.

Dirección General de Normas. (1984). *Determinación del grado Brix en muestras de meladura; masas cocidas; mieles “A” y “B” de refinera y miel final. Por método hidrómetro. Normas Mexicanas*. México D. F., México: Dirección General de Normas

Downing, D. (1996). *A complete course in canning: Processing procedures for canned food products*. Timonium, USA: CTI Publications Inc.

Espinoza, J. (2008). *Estudio de la sustitución parcial de mora por remolacha (beta vulgaris variedad conditiva) en la elaboración de mermelada de mora para la industria pastelera*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.

European Food Information Council, EUFIC. (2009). *Información sobre los aditivos alimentarios*. Recuperado de <http://www.eufic.org/article/es/artid/Informacion-aditivos-alimentarios/>

García, G., & Oliveros, N. (2010). *Proyecto de factibilidad para la producción y comercialización de conservas de frutilla en la ciudad de Azogues*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

Gutiérrez, H. (2005). *Calidad Total y Productividad*. México D.F., México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S. A.

Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. México D.F., México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S. A.

Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos, ICTA. (2009). *Procesamiento y Conservación de frutas*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/2006228/teoria/obmerm/p1.htm>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1988). *Norma Técnica Ecuatoriana 0419: Conservas vegetales. Mermelada de frutas. Requisitos*. Quito, Ecuador.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). *Norma Técnica Ecuatoriana 1334-1: Rotulado de Productos Alimenticios para Consumo Humano. Parte 1. Requisitos*. Quito, Ecuador.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial. (2009). *Mermeladas, dulces y confituras: mermelada de durazno*. Buenos Aires, Argentina: Ediciones del INTI.

Kenett, R. & Zacks, S. (2000). *Modern Industrial Statistics. Design and Control of Quality and Reliability*. México D. F., México: International Thomson Editores S. A.

Lamberti, M. (2013, 17 de septiembre). *Ibn Razin al-Tuyibi, el gastrónomo* [web log post]. Recuperado de <http://es.paperblog.com/ibn-razin-al-tuyibi-el-gastronomo-2092176/>

Manson, R., Lind, D. & Marchal, W. *Estadística para Administración y Economía*. Bogotá, Colombia: Alfaomega Colombiana S.A.

Marrodan. (1989). *Manual de Operación del Concentrador*. Lodosa, España: Marrodan, maquinaria y procesos para la industria alimentaria.

Minitab Inc. (2015). *SopORTE Técnico de Minitab 17*. Pensilvania, USA. Recuperado de <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/>

Montgomery, D. (2001). *Design and Analysis of Experiments*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Montgomery, D. (2007). *Diseño y análisis de experimentos*. México D.F., México: Editorial Limusa S. S.

Navarrete, S. & Uriarte, J. (2011). *Norma Técnica Obligatoria Nicaraguense de Mermelada de Mango*. León, Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

Osorio, N. (2010). *Sistema de Gestión por Procesos en la Unidad del Servicio de Nutrición y Dietética del Hospital de Especialidades Eugenio Espejo*. Instituto de Altos Estudios Nacionales. Quito, Ecuador.

Organización Internacional de Estandarización. (2005). *Norma Internacional de Sistema de Gestión de Calidad - Fundamentos y Vocabulario ISO 9000*. Ginebra, Suiza.

Oxford Dictionaries. (2015). *Membrillo*. Recuperado de <http://www.oxforddictionaries.com/es/definicion/espanol/membrillo>

Pagano, R. (1998). *Estadística para las Ciencias del Comportamiento*. México, International Thomson Editores.

Pagano, M. & Gauvreau, K. (2001). *Fundamentos de Bioestadística*. México, International Thomson Editores.

Perez, J., Becerril, N., Diaz, Y., Flores, M., Hernández, C., Nieto, L. & Rendón, V. (2011). *Estrategias para el reposicionamiento de la mermelada orgánica Smucker's*. México D. F., México: Instituto Politécnico Nacional.

Petrucchi, R., Harwood, W. & Herring, F. (2003). *Química General*. Madrid, España: Pearson Prentice Hall.

Real Academia Española. (2001). *Diccionario de la Lengua Española*. Madrid, España: Rotapapel, S. L.

Ross, P. (1996). *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*. New York; London, McGraw-Hill/Interamericana Editores, S. A.

Sánchez, J. (2009). *Introducción al Diseño Experimental*. Quito, Ecuador.

Tanco, M., Ilzarbe, L., Viles, E. & Álvarez, M. (2008). *Aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) para la mejora de procesos*. Montevideo, Uruguay: Memorias.

11.ANEXOS

Anexo 1. REG 01 – Plan de Experimentación

REG 01 - PLAN DE EXPERIMENTACIÓN
Programa de Administración y Mejoramiento de Procesos
Área de Jaleas y Mermeladas

Codigo de estudio: 07.02.021

Fecha inicio de experimentación: 10/03/2015

Fecha de realización de la corrida: DD/MM/AAAA

Objetivo del estudio: Disminuir variabilidad en consistencia de mermelada de frutilla

PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN

AREA DE BODEGA Y LABORATORIO			
1. Recepción de Materia Prima: Frutilla			
2. Liberación de Materia Prima:		VALORES REALES	
<i>pH</i>	3,76		
<i>%Sólidos solubles</i>	8,3		° Brix
3. Almacenamiento de frutilla en cámaras de refrigeración			
<i>Temperatura de almacenamiento</i>	De 0°C a 4 °C		°C
Firma de Responsabilidad:			
_____		_____	
Bodeguero		Analista de Laboratorio	

AREA DE PRODUCCIÓN SEMIELABORADO			
4. Preparación de mermelada de frutilla:			
<i>Nombre de operador de producción responsable:</i>		VALORES REALES	
		Operador del Turno _____	
<i>Velocidad del agitador</i>	Alta (32 rpm)		rpm
<i>Presión del concentrador</i>	740 mmHg		mmHg
<i>Tiempo de cocción en concentrador</i>	De 120 min a 135 min		min
Firma de Responsabilidad:			

Operador de concentrador			

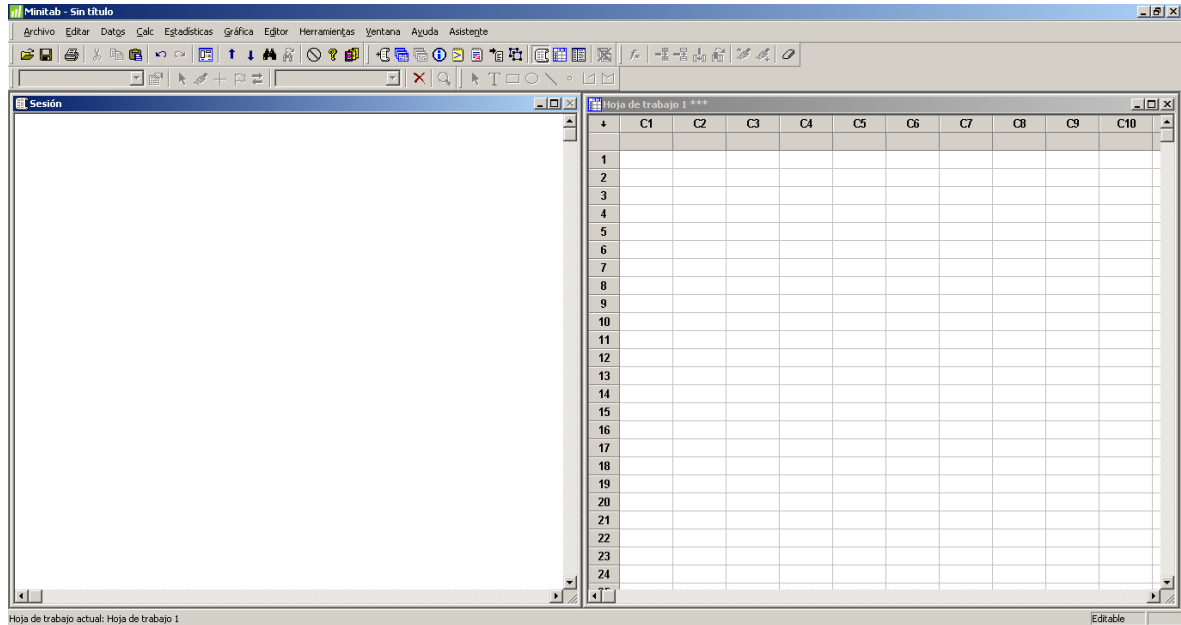
AREA DE PRODUCCIÓN SEMIELABORADO			
5. Envasado, etiquetado y almacenamiento			
<i>Tiempo de cuarentena para liberación del lote:</i>		VALORES REALES	
12 horas			horas
<i>Valor de consistencia de mermelada de frutilla:</i>			cm/30s
Firma de Responsabilidad:			
_____		_____	
Operador de envasado		Analista de Laboratorio	

OBSERVACIONES _____

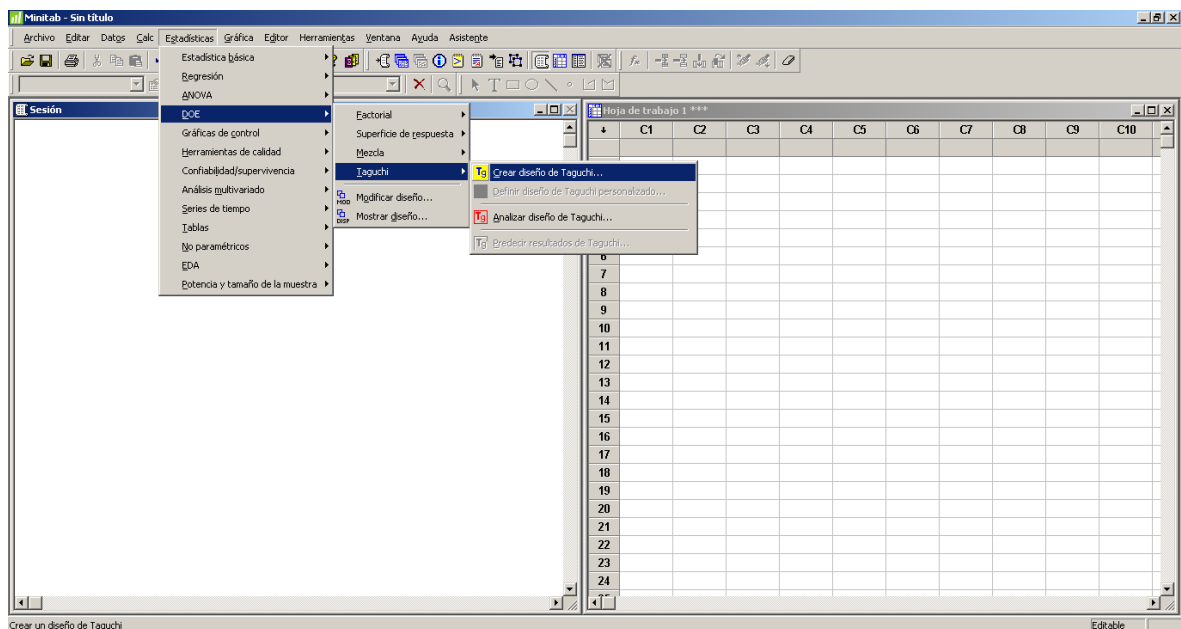
Hoja de trabajo: 1 de 18

Anexo 2. Manual de Operación en Minitab 16 para Diseño de Taguchi

1. Abrir una hoja de trabajo en el programa Minitab 16

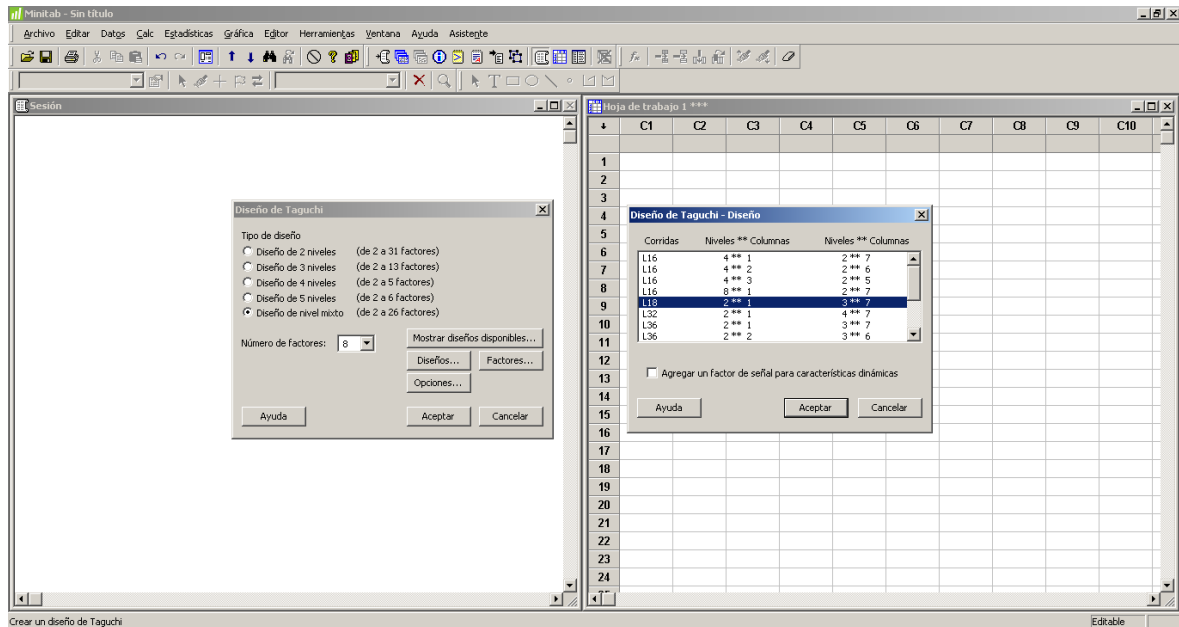


2. En la barra de menús, ir a la opción Estadísticas/DOE/Taguchi/Crear diseño de Taguchi...



- En la ventana abierta, escoger el tipo de diseño a aplicar y el número de factores de estudio. En el botón de “Diseños...” escoger el diseño de Taguchi de acuerdo a las corridas experimentales. Finalmente dar click en Aceptar.

Para el presente caso de estudio se debe escoger el diseño de nivel mixto, número de factores 8 y el diseño de Taguchi L18.

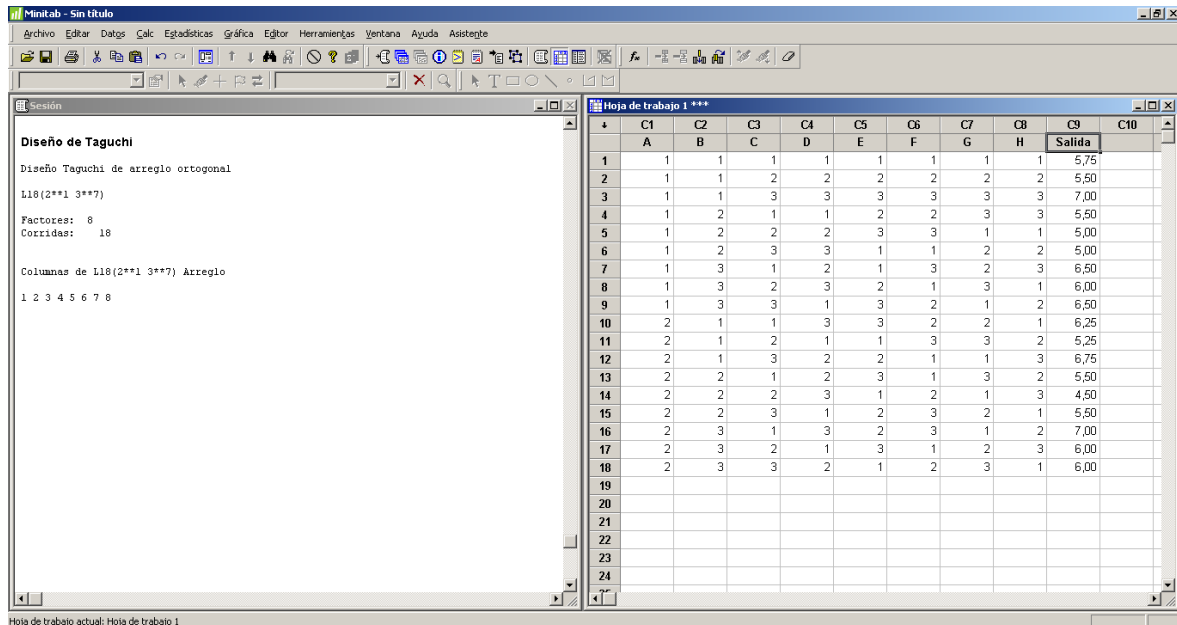


- En la hoja de trabajo se observa el diseño experimental creado por el paquete estadístico.

The screenshot shows the Minitab worksheet with the experimental design for a Taguchi L18(2**1 3**7) design. The design is displayed in a table with columns C1 to C10 and rows 1 to 18. The design is a mixed-level design with 8 factors and 18 runs. The design is displayed in a table with columns C1 to C10 and rows 1 to 18. The design is a mixed-level design with 8 factors and 18 runs.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	A	B	C	D	E	F	G	H		
1	1	1	1	1	1	1	1	1		
2	1	1	2	2	2	2	2	2		
3	1	1	3	3	3	3	3	3		
4	1	2	1	1	2	2	3	3		
5	1	2	2	2	3	3	1	1		
6	1	2	3	3	1	1	2	2		
7	1	3	1	2	1	3	2	3		
8	1	3	2	3	2	1	3	1		
9	1	3	3	1	3	2	1	2		
10	2	1	1	3	3	2	2	1		
11	2	1	2	1	1	3	3	2		
12	2	1	3	2	2	1	1	3		
13	2	2	1	2	3	1	3	2		
14	2	2	2	3	1	2	1	3		
15	2	2	3	1	2	3	2	1		
16	2	3	1	3	2	3	1	2		
17	2	3	2	1	3	1	2	3		
18	2	3	3	2	1	2	3	1		

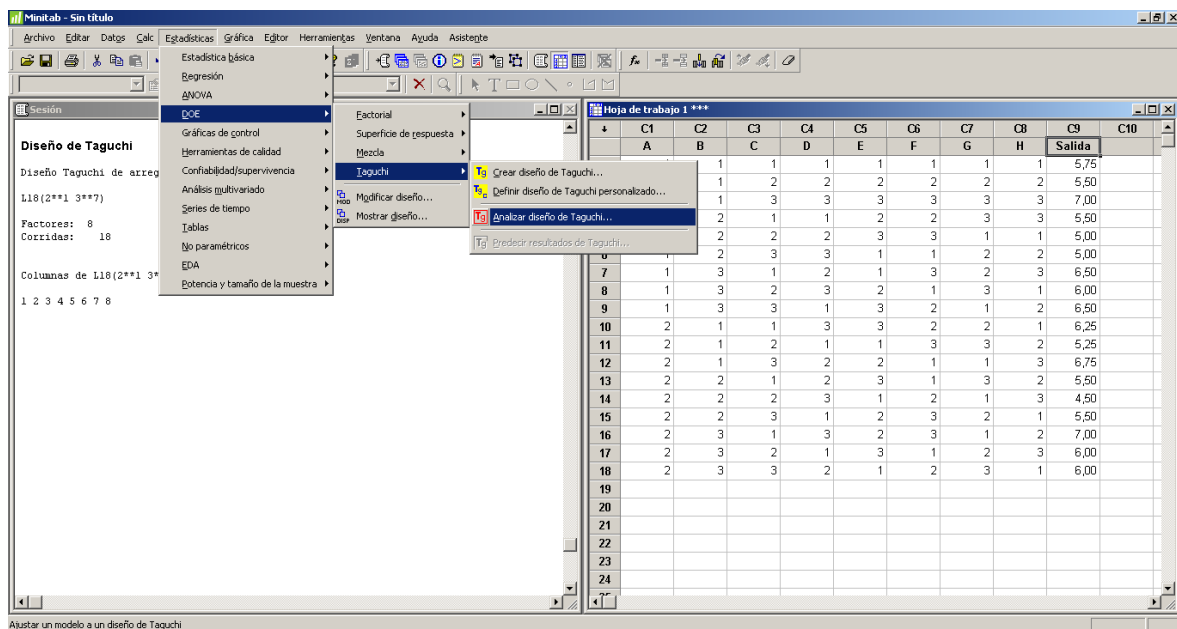
5. En la siguiente columna vacía, se debe ingresar los valores obtenidos tras la experimentación de la variable de salida. En este caso, se ingresan los valores de consistencia de mermelada obtenido tras cada corrida experimental.



The screenshot shows the Minitab 'Hoja de trabajo 1 ***' window. On the left, the 'Diseño de Taguchi' panel displays 'Diseño Taguchi de arreglo ortogonal', 'L18(2**1 3**7)', 'Factores: 8', 'Corridas: 18', and 'Columnas de L18(2**1 3**7) Arreglo: 1 2 3 4 5 6 7 8'. The main table has columns C1 through C10. C1-C8 contain the experimental design factors, C9 is labeled 'Salida', and C10 is empty. The 'Salida' column contains the following values for runs 1 through 18: 5,75, 5,50, 7,00, 5,50, 5,00, 5,00, 6,50, 6,00, 6,50, 6,25, 5,25, 6,75, 5,50, 4,50, 5,50, 7,00, 6,00, 6,00.

	C1 A	C2 B	C3 C	C4 D	C5 E	C6 F	C7 G	C8 H	C9 Salida	C10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	5,75	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	5,50	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	7,00	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	5,50	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	5,00	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	5,00	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	6,50	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	6,00	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	6,50	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	6,25	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	5,25	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	6,75	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	5,50	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	4,50	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	5,50	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	7,00	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	6,00	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	6,00	
19										
20										
21										
22										
23										
24										

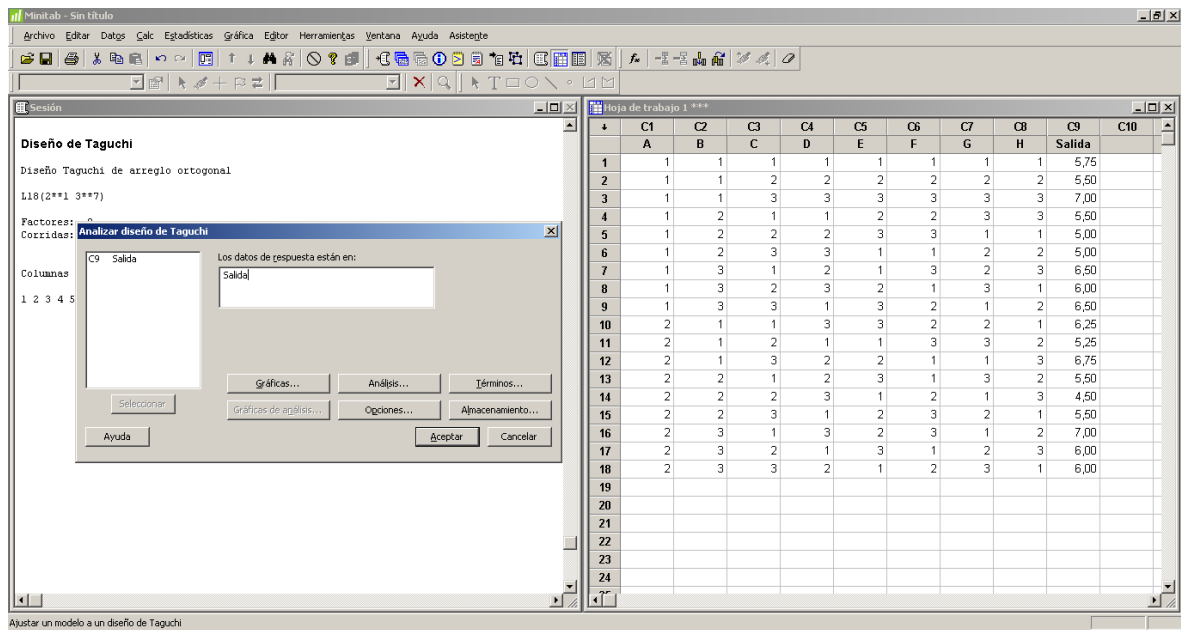
6. En la barra de menús, ir a la opción Estadísticas/DOE/Taguchi/Analizar diseño de Taguchi...



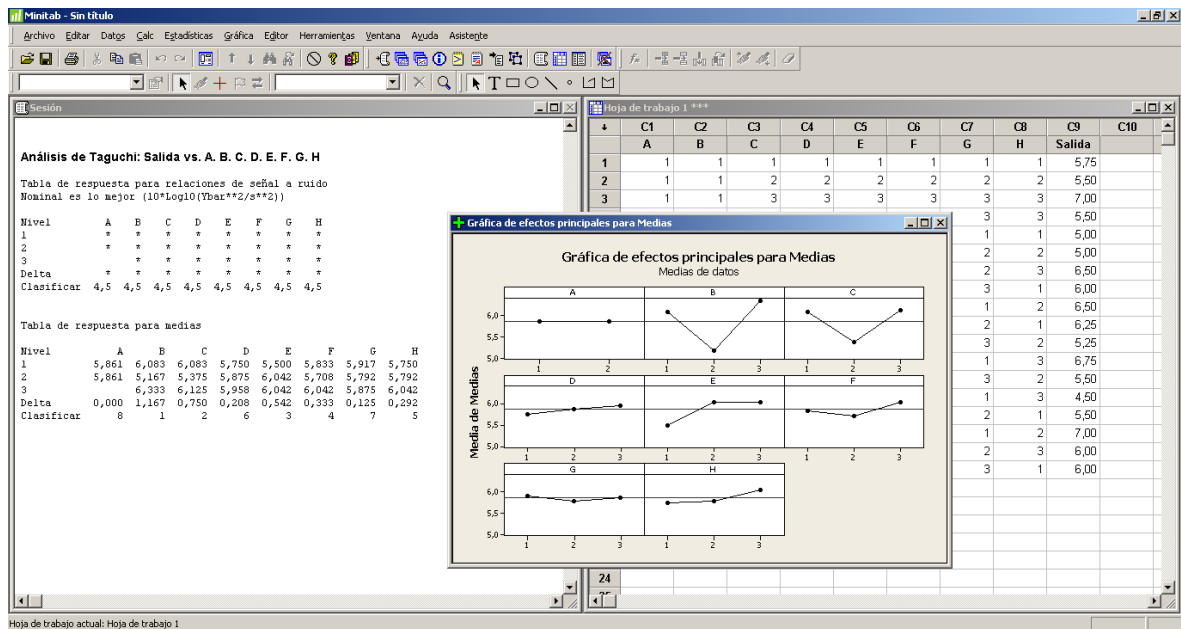
The screenshot shows the Minitab 'Hoja de trabajo 1 ***' window with the 'Estadísticas' menu open. The path 'DOE' > 'Taguchi' > 'Analizar diseño de Taguchi...' is highlighted. The background table is the same as in the previous screenshot.

	C1 A	C2 B	C3 C	C4 D	C5 E	C6 F	C7 G	C8 H	C9 Salida	C10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	5,75	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	5,50	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	7,00	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	5,50	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	5,00	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	5,00	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	6,50	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	6,00	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	6,50	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	6,25	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	5,25	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	6,75	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	5,50	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	4,50	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	5,50	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	7,00	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	6,00	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	6,00	
19										
20										
21										
22										
23										
24										

7. En la ventana abierta, se debe seleccionar la columna de la variable de salida ingresado en el paso anterior como datos de respuesta. Hacer click en Aceptar.

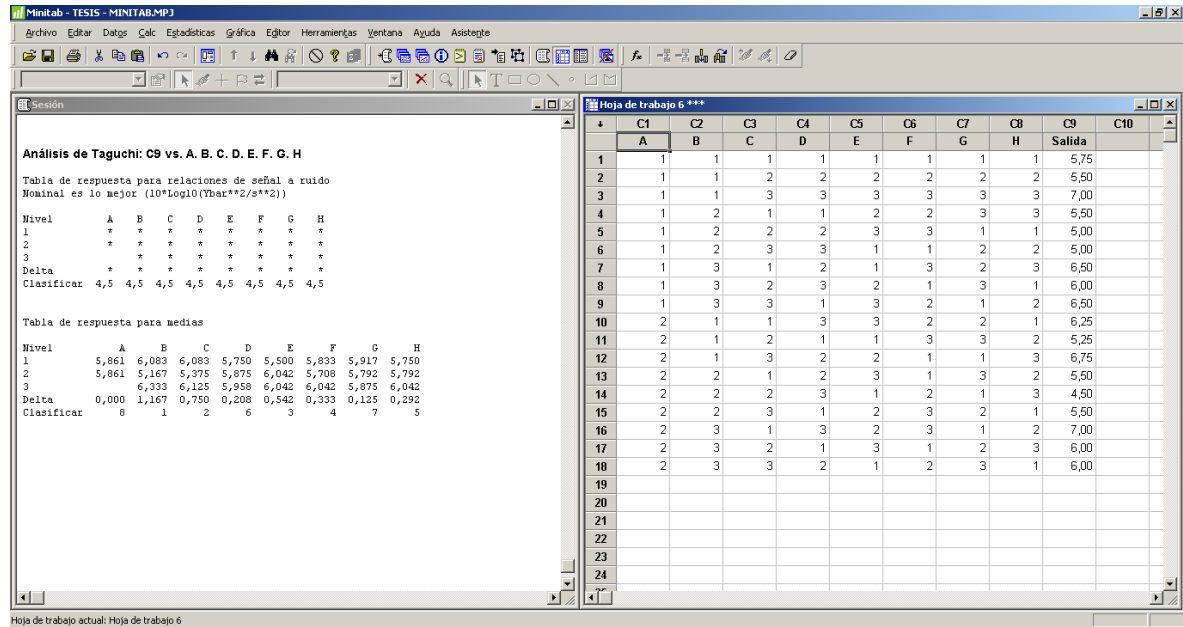


8. En la hoja de trabajo se presenta el análisis de los datos, y un gráfico de los efectos principales de las medias.



Anexo 3. Manual de Operación en Minitab 16 para Predecir resultado de Diseño de Taguchi

1. Partir del análisis de datos de Diseño de Taguchi (Anexo 2)



Análisis de Taguchi: C9 vs. A. B. C. D. E. F. G. H

Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido
Nominal es lo mejor ($10 \cdot \log_{10}(\bar{Y}bar^2/s^2)$)

Nivel	A	B	C	D	E	F	G	H
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*
Delta	*	*	*	*	*	*	*	*
Clasificar	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

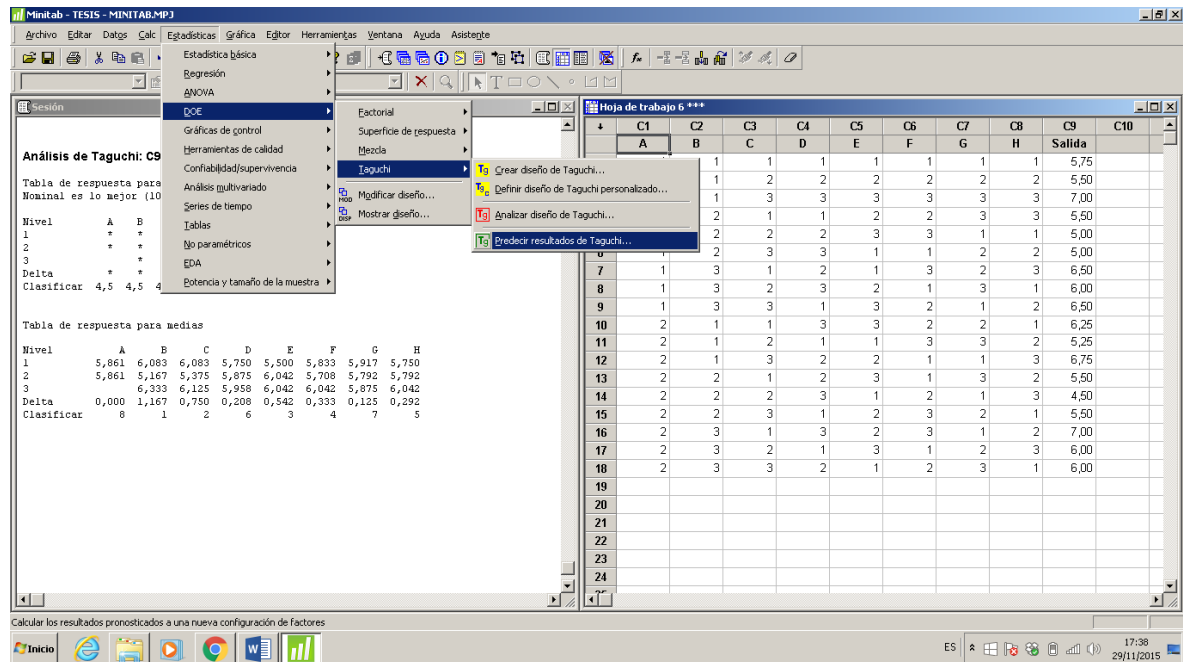
Tabla de respuesta para medias

Nivel	A	B	C	D	E	F	G	H
1	5,861	6,083	6,083	5,750	5,500	5,833	5,917	5,750
2	5,861	5,167	5,375	5,875	6,042	5,708	5,792	5,792
3	6,333	6,125	5,958	6,042	6,042	5,875	6,042	6,042
Delta	0,000	1,167	0,750	0,208	0,542	0,333	0,125	0,292
Clasificar	8	1	2	6	3	4	7	5

Hoja de trabajo 6 ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	A	B	C	D	E	F	G	H	Salida	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	5,75	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	5,50	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	7,00	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	5,50	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	5,00	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	5,00	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	6,50	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	6,00	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	6,50	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	6,25	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	5,25	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	6,75	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	5,50	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	4,50	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	5,50	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	7,00	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	6,00	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	6,00	
19										
20										
21										
22										
23										
24										

2. En la barra de menús, ir a la opción Estadísticas/DOE/Taguchi/Predecir resultados de Taguchi...



Estadísticas > DOE > Taguchi > Predecir resultados de Taguchi...

Hoja de trabajo 6 ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	A	B	C	D	E	F	G	H	Salida	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	5,75	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	5,50	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	7,00	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	5,50	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	5,00	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	5,00	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	6,50	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	6,00	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	6,50	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	6,25	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	5,25	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	6,75	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	5,50	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	4,50	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	5,50	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	7,00	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	6,00	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	6,00	
19										
20										
21										
22										
23										
24										

- En la ventana abierta, se debe seleccionar la opción Media y la opción Almacenar valores pronosticados en la hoja de trabajo.

Posteriormente, dar click en el botón de Niveles... y escoger la opción de Unidades no codificadas, y la opción Seleccionar los niveles de una lista. Para cada factor, se debe escoger el nivel con el que se desea predecir el valor del Diseño de Taguchi.

Para este ejemplo se escogió:

FACTOR	A	B	C	D	E	F	G	H
NIVEL	1	2	2	2	3	3	1	1

Finalmente, hacer click en Aceptar, y nuevamente en Aceptar.

Análisis de Taguchi: C9 vs. A, B, C, D, E

Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido
Nominal es lo mejor ($10 \cdot \log_{10}(\bar{Y})$)

Nivel	A	B	C	D	E
1	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*
Delta	*	*	*	*	*
Clasificar	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

Tabla de respuesta para medias

Nivel	A	B	C	D	E	F	G	H
1	5,861	6,083	6,083	5,750	5,500	5,833	5,917	5,750
2	5,861	5,167	5,375	5,875	6,042	5,700	5,792	5,792
3	6,333	6,125	5,958	6,042	6,042	5,875	6,042	6,042
Delta	0,000	1,167	0,750	0,208	0,542	0,333	0,125	0,292
Clasificar	8	1	2	6	3	4	7	5

Predecir resultados de Taguchi - Niveles

Especificar niveles nuevos de factores en:
☐ Unidades no codificadas
☐ Unidades codificadas

Método para especificar niveles de factores nuevos:
☐ Seleccionar variables almacenadas en hoja de trabajo
☐ Seleccionar niveles de una lista

Factor	Niveles
A	1
B	2
C	2
D	2
E	3

4. En la hoja de trabajo, se presenta el valor de la media pronosticada para la variable de salida con los niveles escogidos para cada factor.

Minitab - TESIS - MINITAB.MPJ

Archivo Editor Datos Calc Estadísticas Gráfica Editor Herramientas Ventana Ayuda Asistente

Sesión

Análisis de Taguchi: Salida vs. A. B. C. D. E. F. G. H

Valores pronosticados

Media
5

Niveles de factores para predicciones

A	B	C	D	E	F	G	H
1	2	2	3	3	1	1	1

Hoja de trabajo 6 ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	A	B	C	D	E	F	G	H	Salida	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	5,75	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	5,50	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	7,00	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	5,50	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	5,00	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	5,00	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	6,50	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	6,00	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	6,50	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	6,25	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	5,25	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	6,75	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	5,50	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	4,50	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	5,50	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	7,00	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	6,00	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	6,00	
19										
20										
21										
22										
23										
24										

Hoja de trabajo actual: Hoja de trabajo 6